

Document made available under the Patent Cooperation Treaty (PCT)

International application number: PCT/JP05/003533

International filing date: 02 March 2005 (02.03.2005)

Document type: Certified copy of priority document

Document details: Country/Office: JP
Number: 2004-063518
Filing date: 08 March 2004 (08.03.2004)

Date of receipt at the International Bureau: 28 April 2005 (28.04.2005)

Remark: Priority document submitted or transmitted to the International Bureau in compliance with Rule 17.1(a) or (b)



World Intellectual Property Organization (WIPO) - Geneva, Switzerland
Organisation Mondiale de la Propriété Intellectuelle (OMPI) - Genève, Suisse

日 本 国 特 許 庁
JAPAN PATENT OFFICE

07.3.2005

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されている事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this Office.

出 願 年 月 日
Date of Application: 2 0 0 4 年 3 月 8 日

出 願 番 号
Application Number: 特 願 2 0 0 4 - 0 6 3 5 1 8

パリ条約による外国への出願
に用いる優先権の主張の基礎
となる出願の国コードと出願
番号

The country code and number
of your priority application,
to be used for filing abroad
under the Paris Convention, is

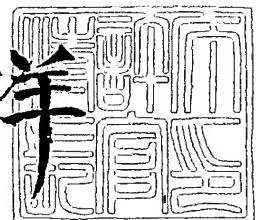
J P 2 0 0 4 - 0 6 3 5 1 8

出 願 人
Applicant(s): 松下電器産業株式会社

2 0 0 5 年 4 月 1 4 日

特許庁長官
Commissioner,
Japan Patent Office

小 川 洋



【書類名】 特許願
【整理番号】 2032460024
【提出日】 平成16年 3月 8日
【あて先】 特許庁長官殿
【国際特許分類】 G02B 26/06
【発明者】
 【住所又は居所】 大阪府門真市大字門真 1 0 0 6 番地 松下電器産業株式会社内
 【氏名】 虫鹿 由浩
【特許出願人】
 【識別番号】 000005821
 【氏名又は名称】 松下電器産業株式会社
【代理人】
 【識別番号】 100097445
 【弁理士】
 【氏名又は名称】 岩橋 文雄
【選任した代理人】
 【識別番号】 100103355
 【弁理士】
 【氏名又は名称】 坂口 智康
【選任した代理人】
 【識別番号】 100109667
 【弁理士】
 【氏名又は名称】 内藤 浩樹
【手数料の表示】
 【予納台帳番号】 011305
 【納付金額】 21,000円
【提出物件の目録】
 【物件名】 特許請求の範囲 1
 【物件名】 明細書 1
 【物件名】 図面 1
 【物件名】 要約書 1
 【包括委任状番号】 9809938

【書類名】特許請求の範囲

【請求項 1】

基台と、

前記基台上に形成された弾性を有する弾性支持部と、

前記弾性支持部によって概ね中央部を支持されて、前記基台に垂直な方向への変位と、前記基台に対する傾動とを可能に設けられた可動部と、

前記中央部を含む傾動軸を中心に互いに反対側に振り分けられた平面位置関係を持つように配置され、前記可動部に基台と垂直な方向への駆動力を与える少なくとも 2 つの駆動部とを備え、

前記弾性支持部が前記可動部の垂直方向への変位に応じて発生する復元力のバネ定数を k_z (N/m)、前記弾性支持部が前記可動部の傾動角度に応じて発生する復元トルクのバネ定数を k_r (Nm/rad)、前記傾動軸と前記駆動部の中心位置との距離を L (m) としたときに、前記 k_z と前記 k_r と前記 L とが

$$0.5 \leq L^2 \cdot k_z / k_r \leq 2$$

の関係を備えるマイクロアクチュエータ。

【請求項 2】

基台と、

前記基台上に形成された弾性を有する弾性支持部と、

前記弾性支持部によって概ね中央部を支持されて、前記基台に垂直な方向への変位と、前記基台に対する 2 軸の傾動とを可能に設けられた可動部と、

前記中央部を中心としてこれを取り巻くような平面位置関係を持つように配置され、前記可動部に基台と垂直な方向への駆動力を与える少なくとも 3 つの駆動部とを備え、

前記弾性支持部が前記可動部の垂直方向への変位に応じて発生する復元力のバネ定数を k_z (N/m)、前記弾性支持部が前記可動電極の傾動角度に応じて発生する 2 軸の復元トルクのバネ定数をそれぞれ k_{rx} (Nm/rad)、 k_{ry} (Nm/rad)、前記駆動部の中心位置と前記中央部の中心位置との距離を R (m) としたときに、前記 k_z と前記 k_{rx} と前記 k_{ry} と前記 R とが

$$1 \leq R^2 \cdot k_z / k_{rx} \leq 5、$$

$$1 \leq R^2 \cdot k_z / k_{ry} \leq 5、$$

$$0.67 \leq k_{rx} / k_{ry} \leq 1.5$$

の関係を備えるマイクロアクチュエータ。

【請求項 3】

前記可動部が可動電極を備え、前記駆動部が前記基台に固定された固定電極を備え、前記可動電極と前記固定電極との間に電位差を与えて発生させた静電力により前記可動電極を駆動する請求項 1 または 2 に記載のマイクロアクチュエータ。

【請求項 4】

前記駆動部の各々が前記中央部を中心に概対称配置された請求項 1 から 3 のいずれか一項に記載のマイクロアクチュエータ。

【請求項 5】

前記基台に固定された固定端から前記可動部に接続された可動端に向けて延在する前記弾性支持部の梁部分の中で、互いに最も離れた 2 つの部分同士の直線距離を H としたときに、前記 H と前記 R とが

$$0.8 \leq H / R \leq 1.6$$

の関係を備える請求項 2 から 4 のいずれか一項に記載のマイクロアクチュエータ。

【請求項 6】

前記弾性支持部の最も前記中央部から離れた梁部分が、前記固定端である請求項 5 に記載のマイクロアクチュエータ。

【請求項 7】

前記弾性支持部が梁の延在方向を反転させる折り返し部を備える請求項 1 から 6 のいずれか一項に記載のマイクロアクチュエータ。

【請求項 8】

前記固定端を前記折り返し部よりも前記中央部に近い位置に配置した請求項 7 に記載のマイクロアクチュエータ。

【請求項 9】

前記可動部と前記駆動部と前記弾性支持部とを含む単位セルをアレイ状に複数配列した請求項 1 から 8 のいずれか一項に記載のマイクロアクチュエータ。

【請求項 10】

隣接する前記単位セル同士の配列ピッチを P (m)、前記駆動部の中心位置と前記中央部の中心位置との距離を R (m) としたときに、前記 P と前記 R とが

$$0.29 \leq R/P \leq 0.37$$

の関係を備える請求項 9 に記載のマイクロアクチュエータ。

【請求項 11】

前記駆動部が前記可動部を吸引する方向のみに駆動力を与えると共に、前記可動電極を一方の前記駆動部が吸引した場合に、前記可動電極が他方の前記駆動部から離れる方向に変位するように、前記弾性支持部が前記可動電極を支持する請求項 1 から 10 のいずれか一項に記載のマイクロアクチュエータ。

【請求項 12】

前記 k_z と前記 k_r と前記 L とがさらに、

$$1 \leq L^2 \cdot k_z / k_r$$

の関係を備える請求項 1 に記載のマイクロアクチュエータ。

【請求項 13】

前記 k_z と前記 k_{rx} と前記 k_{ry} と前記 R とがさらに、

$$2 \leq R^2 \cdot k_z / k_{rx},$$

$$2 \leq R^2 \cdot k_z / k_{ry}$$

の関係を備える請求項 2 に記載のマイクロアクチュエータ。

【請求項 14】

前記可動部が光反射面を備え、前記可動部を変位させて前記光反射面に入射した光の波面を変化させる請求項 1 から 13 のいずれか一項に記載のマイクロアクチュエータを含む物品。

【請求項 15】

光を発生する光源をさらに備えた請求項 14 に記載のマイクロアクチュエータを備えた物品。

【請求項 16】

光の波面に関わる情報を検出する波面情報検出部をさらに備え、前記波面情報検出部の出力に応じて前記可動部を変位させる請求項 14 または 15 に記載のマイクロアクチュエータを備えた物品。

【請求項 17】

前記各駆動部に制御信号を出力して、前記可動部の変位を制御する制御部を備えた請求項 1 から 16 のいずれか一項に記載のマイクロアクチュエータを備えた物品。

【請求項 18】

前記制御部が、前記可動部の変位を 3 段階以上の多段階に設定可能な前記制御信号を出力する請求項 17 に記載のマイクロアクチュエータを備えた物品。

【請求項 19】

前記制御部が、前記各駆動部の中心位置における前記可動部の目標変位量に応じた前記制御信号を生成する請求項 17 または 18 に記載のマイクロアクチュエータを備えた物品。

【書類名】 明細書**【発明の名称】** マイクロアクチュエータ、およびマイクロアクチュエータを備えた物品**【技術分野】****【0001】**

本発明は、傾動と垂直変位が可能なマイクロアクチュエータと、このマイクロアクチュエータを備えた物品に関する。

【背景技術】**【0002】**

MEMS (Micro Electro Mechanical System) 技術を用いて多様なマイクロアクチュエータが作成され、光学、高周波回路、バイオなど様々な分野への応用が期待されている。例えば補償光学 (Adaptive Optics) 分野では、光の波面を制御するためのマイクロミラーアレイが開発されている。こうした用途では、光の波面を滑らかに制御するために、1つ1つの光反射面を基台に対して傾動させると同時に垂直変位をさせることが有効である。

【0003】

このような傾動と垂直変位が可能なマイクロアクチュエータの例は、非特許文献1に開示されている。この構成の単純化された概略を図10に記載する。図10は従来例におけるマイクロアクチュエータの斜視図である。

【0004】

可動電極100は、その外周部を3本の弾性梁101a、101b、101cにより支持されている。また、可動電極100は3つの固定電極102a、102b、102cと対向している。固定電極102a、102b、102cはそれぞれ独立に駆動電圧を印加可能に設けられ、可動電極100との間で電位差が与えられる。これにより、可動電極100を吸引する方向に静電力が発生する。

【0005】

固定電極102a～102cの駆動電圧を同一に設定すれば、可動電極100はほぼ傾動せずに下方向に垂直変位する。また、これらの駆動電圧を互いに異ならせれば、可動電極100は所望の方向に傾動しながら下方向に垂直変位する。このように、可動電極100は下方向への垂直変位と同時に2軸の傾動が可能である。

【0006】

ミラー103は、接合部104において可動電極100と接合されているため、可動電極100の変位がそのままミラー103の変位を決定する。

【非特許文献1】 U.Srinivasan, et al., "Fluidic Self-Assembly of Micromirrors Onto Microactuators Using Capillary Forces", IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics, Vol. 8, No.1, pp.4-11 (January, 2002)

【発明の開示】**【発明が解決しようとする課題】****【0007】**

しかしながら、上記のようなマイクロアクチュエータは、固定電極の駆動信号とミラー変位との関係における非対角性が高いという課題がある。

【0008】

この内容を図11を用いて模式的に説明する。図11は従来例におけるマイクロアクチュエータの動作説明図である。図11は模式化した断面図としたために、2本の弾性梁101a、101bと、2つの固定電極102a、102bのみが図示されている。固定電極102aの駆動力の発生中心位置を点A、固定電極102bの駆動力の発生中心位置を点Bとする。

【0009】

ここでは、固定電極102aのみに所定の電圧を印加して可動電極100を吸引した場合について説明する。固定電極102aは駆動力Fを発生し、点Aにおいて可動電極100は垂直方向に δ だけ変位する。このとき、駆動力を発生していない固定電極102bの

中心位置である点Bにおいても可動電極100は垂直方向に δ' だけ変位している。この変位 δ' と変位 δ との比の値 δ'/δ を非対角性の大きさの指標とする。

【0010】

可動電極100の姿勢制御の観点から、こうした非対角性は小さい方がよい。非対角性の変位の目標分解能に対して十分小さければ、各点A、Bにおける可動電極100の変位をそれぞれ対応する固定電極への印加電圧で対角的に制御でき、簡素な制御構成にすることができる。また、非対角性を補正する制御を行う場合でも、非対角性が小さいほど制御の高精度化と簡素化が容易となる。特に静電駆動の場合は駆動力が吸引方向にしか発生しないため、 δ' を0に戻す方向への補正制御が難しいことや、あるいはマイクロアクチュエータの特性のばらつきが大きい場合は非対角性の補正のためのデータ量が膨大になること等から、非対角性の小さいマイクロアクチュエータが望まれている。

【0011】

しかしながら、図から明らかなように、可動電極100の外周を支持して、その内側に固定電極を形成した構成では、1つの固定電極102aの駆動力Fによって可動電極100の全ての点が下方向に変位してしまうために、この非対角性が極めて大きい。こうした構成では設計上の工夫をしても非対角性 δ'/δ を1/3以下にすることは極めて困難であった。

【0012】

本発明は、上記事情に鑑みてなされたものであり、その目的とするところは、駆動力と可動部の変位との対角性を高めたマイクロアクチュエータおよびこのマイクロアクチュエータを備えた物品を提供することにある。

【課題を解決するための手段】

【0013】

前記従来の課題を解決するために、本発明のマイクロアクチュエータは、基台と、前記基台上に形成された弾性を有する弾性支持部と、前記弾性支持部によって概ね中央部を支持されて、前記基台に垂直な方向への変位と、前記基台に対する傾動とを可能に設けられた可動部と、前記中央部を含む傾動軸を中心に互いに反対側に振り分けられた平面位置関係を持つように配置され、前記可動部に基台と垂直な方向への駆動力を与える少なくとも2つの駆動部とを備え、前記弾性支持部が前記可動部の垂直方向への変位に応じて発生する復元力のバネ定数を k_z (N/m)、前記弾性支持部が前記可動部の傾動角度に応じて発生する復元トルクのバネ定数を k_r (Nm/rad)、前記傾動軸と前記駆動部の中心位置との距離を L (m)としたときに、前記 k_z と前記 k_r と前記 L とが

$$0.5 \leq L^2 \cdot k_z / k_r \leq 2$$

の関係を備える。

【0014】

また、本発明のマイクロアクチュエータは、基台と、前記基台上に形成された弾性を有する弾性支持部と、前記弾性支持部によって概ね中央部を支持されて、前記基台に垂直な方向への変位と、前記基台に対する2軸の傾動とを可能に設けられた可動部と、前記中央部を中心としてこれを取り巻くような平面位置関係を持つように配置され、前記可動部に基台と垂直な方向への駆動力を与える少なくとも3つの駆動部とを備え、前記弾性支持部が前記可動部の垂直方向への変位に応じて発生する復元力のバネ定数を k_z (N/m)、前記弾性支持部が前記可動電極の傾動角度に応じて発生する2軸の復元トルクのバネ定数をそれぞれ k_{rx} (Nm/rad)、 k_{ry} (Nm/rad)、前記駆動部の中心位置と前記中央部の中心位置との距離を R (m)としたときに、前記 k_z と前記 k_{rx} と前記 k_{ry} と前記 R とが

$$1 \leq R^2 \cdot k_z / k_{rx} \leq 5、$$

$$1 \leq R^2 \cdot k_z / k_{ry} \leq 5、$$

$$0.67 \leq k_{rx} / k_{ry} \leq 1.5$$

の関係を備える。

【0015】

好ましい実施の形態において、前記可動部が可動電極であり、前記駆動部が前記基台に固定された固定電極であり、前記可動電極と前記固定電極との間に電位差を与えて発生させた静電力により前記可動電極を駆動する。

【0016】

好ましい実施の形態において、前記駆動部の各々が前記中央部を中心に概対称配置される。

【0017】

好ましい実施の形態において、前記基台に固定された固定端から前記可動部に接続された可動端に向けて延在する前記弾性支持部の梁部分の中で、互いに最も離れた2つの部分同士の直線距離をHとしたときに、前記Hと前記Rとが

$$0.8 \leq H/R \leq 1.6$$

の関係を備える。

【0018】

好ましい実施の形態において、前記弾性支持部の最も前記中央部から離れた梁部分が、前記固定端である。

【0019】

好ましい実施の形態において、前記弾性支持部が梁の延在方向を反転させる折り返し部を備える。

【0020】

好ましい実施の形態において、前記固定端を前記折り返し部よりも前記中央部に近い位置に配置する。

【0021】

好ましい実施の形態において、前記可動部と前記駆動部と前記弾性支持部とを含む単位セルをアレイ状に複数配列する。

【0022】

好ましい実施の形態において、隣接する前記単位セル同士の配列ピッチをP (m)、前記駆動部の中心位置と前記中央部の中心位置との距離をR (m)としたときに、前記Pと前記Rとが

$$0.29 \leq R/P \leq 0.37$$

の関係を備える。

【0023】

好ましい実施の形態において、前記駆動部が前記可動部を吸引する方向のみに駆動力を与えると共に、前記可動電極を一方の前記駆動部が吸引した場合に、前記可動電極が他方の前記駆動部から離れる方向に変位するように、前記弾性支持部が前記可動電極を支持する。

【0024】

好ましい実施の形態において、前記k_zと前記k_rと前記Lとがさらに、

$$1 \leq L^2 \cdot k_z / k_r$$

の関係を備える。

【0025】

好ましい実施の形態において、前記k_zと前記k_{rx}と前記k_{ry}と前記Rとがさらに、

$$2 \leq R^2 \cdot k_z / k_{rx}$$

$$2 \leq R^2 \cdot k_z / k_{ry}$$

の関係を備える。

【0026】

また、本発明のマイクロアクチュエータを含む物品は、前記可動部が光反射面を備え、前記可動部を変位させて前記光反射面に入射した光の波面を変化させると共に、前記マイクロアクチュエータは、上記のいずれかマイクロアクチュエータである。

【0027】

好ましい実施の形態において、光を発生する光源をさらに備える。

【0028】

好ましい実施の形態において、光の波面に関わる情報を検出する波面情報検出部をさらに備え、前記波面情報検出部の出力に応じて前記可動部を変位させる。

【0029】

また、本発明のマイクロアクチュエータを含む物品は、前記各駆動部に制御信号を出力して、前記可動部の変位を制御する制御部を備えると共に、前記マイクロアクチュエータは、上記のいずれかマイクロアクチュエータである。

【0030】

好ましい実施の形態において、前記制御部が、前記可動部の変位を3段階以上の多段階に設定可能な前記制御信号を出力する。

【0031】

好ましい実施の形態において、前記制御部が、前記各駆動部の中心位置における前記可動部の目標変位量に応じた前記制御信号を生成する。

【発明の効果】

【0032】

本発明のマイクロアクチュエータによれば、弾性支持部が可動部の概ね中央部を支持し、可動部の垂直方向への変位に応じたバネ定数と可動部の傾動角度に応じたバネ定数とに特定の関係を持たせることによって、駆動部の駆動力と可動部の変位との対角性を高めることができる。

【0033】

また、本発明のマイクロアクチュエータを備えた物品によれば、制御信号と可動部の変位との独立性を高めているため、制御の簡素化と高精度化とを図ることができる。

【発明を実施するための最良の形態】

【0034】

以下本発明の実施の形態について、図面を参照しながら説明する。

【0035】

(実施の形態1)

図1から図4を参照しながら、本発明によるマイクロアクチュエータの実施の形態1を説明する。まず、図1を参照する。図1は本発明の実施の形態1におけるマイクロアクチュエータの分解斜視図である。図1(a)は1つのマイクロアクチュエータの拡大分解斜視図である。

【0036】

基板1はシリコン基板である。本実施の形態では、基板1が本発明の特許請求の範囲に記載された基台に相当する。基板1上には駆動回路1aが形成され、その上に絶縁層2が形成される。絶縁層2上には、接地配線部3と3つの固定電極4a、4b、4cが形成される。接地配線部3と固定電極4a～4cには、アルミニウム(A1)合金、ポリシリコンゲルマニウム(Poly-SiGe)等の450℃以下で低温成膜が可能な導電材料が用いられる。固定電極4a～4cは、それぞれが絶縁層2に形成されたビア(不図示)によって駆動回路1aに接続される。駆動回路1aは、0～30Vの範囲内で各々独立した駆動電圧を固定電極4a～4cに印加することができる。この駆動電圧は例えば10bitの多段階の値として設定され得る。

【0037】

接地配線部3と固定電極4a～4c上にはフォトレジストによる第1の犠牲層(不図示)が形成され、その上に弾性を有する弾性支持部5が形成される。

【0038】

弾性支持部5は、3本の弾性梁5a～5cと、これらの弾性梁5a～5cを接地配線部3に固定する固定部5d～5fと、可動電極6を支持するための支持部5gとを備える。弾性梁5a～5cの端部のうち、固定部5d～5fに接続された側の端部を固定端5h～5j、支持部5gに接続された側の端部を可動端5k～5mと呼ぶことにする。

【0039】

支持部 5 g は可動電極 6 の中央部に設けられた突起 6 a と接続している。また、3本の弾性梁 5 a ~ 5 c は支持部 5 g を介して互いに連結している。弾性支持部 5 には、接地配線部 3 と固定電極 4 a ~ 4 c と同様の導電材料が用いられる。

【0040】

弾性支持部 5 上にはフォトレジストによる第 2 の犠牲層（不図示）が形成され、その上に可動電極 6 が形成される。可動電極 6 は概正六角形の形状を備え、その上面は光反射面であるミラー部 6 b となっている。可動電極 6 には、接地配線部 3 と固定電極 4 a ~ 4 c と同様の導電材料が用いられる。ミラー部 6 b の光反射効率を高めるためには、金や誘電体多層膜のコーティングを行ってもよい。第 1 および第 2 の犠牲層は最終的には有機溶剤や酸素プラズマ等により除去され、この部分に空隙が形成される。可動電極 6 は弾性支持部 5、接地配線部 3 を介して駆動回路 1 a と接続し、接地電位に保たれている。

【0041】

可動電極 6 は 3 つの固定電極 4 a ~ 4 c と空隙を介して対向しているため、固定電極 4 a ~ 4 c と可動電極 6 との間に電位差が与えられると、静電力に基づく駆動力が発生する。この駆動力によって弾性支持部 5 が弾性的に変形し、その弾性復元力との釣り合いによって可動電極 6 の姿勢が決定する。各固定電極 4 a ~ 4 c が発生する駆動力の大きさによって可動電極 6 は、基板 1 に垂直な方向への変位と、基板 1 に平行で互いに直交する 2 つの傾動軸周りの傾動が制御可能である。

【0042】

この 1 つのマイクロアクチュエータを単位セルとし、これをアレイ化したものを図 1 (b) に示す。図 1 (b) はアレイ化されたマイクロアクチュエータの分解斜視図である。互いに隣接する単位セル同士のピッチ P は $110\mu\text{m}$ である。単位セルの数は 42×36 個とする。

【0043】

次に、図 2、図 3 を用いて、固定電極が発生する駆動力と可動電極の変位との非対角性を低減するための条件について説明する。本実施の形態のマイクロアクチュエータは 2 軸の傾動と 1 軸の垂直変位が可能なのであるが、説明の順序として、まず 1 軸の傾動と 1 軸の垂直変位を行う 1 次元モデルについて説明し、次いで 2 軸の傾動と 1 軸の垂直変位を行う 2 次元モデルについて説明する。

【0044】

図 2 は本発明におけるマイクロアクチュエータの 1 次元モデルによる動作説明図である。図 2 (a) は固定電極 4 a のみに所定の電圧を印加して可動電極 6 を吸引した場合を説明している。

【0045】

固定電極 4 a の駆動力の発生中心位置を点 A、固定電極 4 b の駆動力の発生中心位置を点 B とする。弾性支持部 5 は可動電極 6 を概ね中央部 O で支持し、固定電極 4 a、4 b はこの中央部 O を中心に概対称配置されているため、中央部 O と点 A との距離および中央部 O と点 B との距離はどちらも概等しく L (m) である。

【0046】

弾性支持部 5 は、中央部 O における可動部 6 の垂直変位 δ_o (m) に対してバネ定数 k_z (N/m) で復元力を発生し、可動部 6 の傾動角度 θ (rad) に対してバネ定数 k_r (Nm/rad) で復元トルクを発生する。

【0047】

固定電極 4 a のみに所定の電圧を印加して可動電極 6 を吸引した場合、点 A には駆動力 F が発生し、点 A において可動電極 6 は垂直方向に δ だけ変位する。このとき、駆動力を発生していない固定電極 4 b の中心位置である点 B における可動電極 6 の垂直変位を δ' として、非対角性の大きさ δ' / δ は、(数 1) で与えられる。

【0048】

【数 1】

$$\frac{\delta'}{\delta} = \frac{1 - (L^2 \cdot k_z / k_r)}{1 + (L^2 \cdot k_z / k_r)}$$

【0 0 4 9】

(数 1) から、 $L^2 \cdot k_z / k_r$ の値を 1 に近づけることで、点 A、点 B 間の非対角性の大きさ δ' / δ を所望の値にまで小さくすることが可能であることが判る。非対角性の大きさ δ' / δ と、 $L^2 \cdot k_z / k_r$ で与えられる値とには直接的な対応関係が存在し、この関係を (表 1) に示す。

【0 0 5 0】

【表 1】

非対角性の大きさ δ' / δ	必要な $L^2 \cdot k_z / k_r$ の条件
0. 5	$0. 33 \leq L^2 \cdot k_z / k_r \leq 3$
0. 33 . . . (= 1 / 3)	$0. 5 \leq L^2 \cdot k_z / k_r \leq 2$
0. 25	$0. 6 \leq L^2 \cdot k_z / k_r \leq 1. 67$
0. 2	$0. 67 \leq L^2 \cdot k_z / k_r \leq 1. 5$
0. 1	$0. 82 \leq L^2 \cdot k_z / k_r \leq 1. 2$

【0 0 5 1】

従来例のように弾性支持部が可動電極の外周を支持する構成では、非対角性の大きさ δ' / δ を 1 / 3 以下にすることは困難であることは既に説明した。これに対し本発明の構成では、弾性支持部 5 が可動電極 6 の中央部 O を支持し、弾性支持部 5 のバネ定数 k_z 、 k_r と固定電極 4 の中心位置までの距離 L とが

$$0. 5 \leq L^2 \cdot k_z / k_r \leq 2$$

の関係を持つために、非対角性の大きさ δ' / δ を 1 / 3 以下にすることができる。

【0 0 5 2】

なお、ここでは固定電極 4 a のみが駆動力を発生する場合について説明したが、固定電極 4 a、4 b にそれぞれ任意の駆動力を発生させる場合でも上記の関係は成り立つ。このことを図 2 (b) を用いて説明する。図 2 (b) は固定電極 4 a、4 b にそれぞれ独立の電圧を印加して可動電極 6 を吸引した場合を説明している。

【0 0 5 3】

固定電極 4 a が発生する駆動力を F_a 、固定電極 4 b が発生する駆動力を F_b とし、可動電極 6 の垂直方向への変位量は点 A において δ_a 、点 B において δ_b とする。このとき、変位 δ_a 、 δ_b と駆動力 F_a 、 F_b との関係は (数 2) で与えられる。

【0 0 5 4】

【数 2】

$$\begin{pmatrix} \delta_a \\ \delta_b \end{pmatrix} = \left[\frac{1}{k_z} + \frac{L^2}{k_r} \right] \begin{pmatrix} 1 & \frac{1 - (L^2 \cdot k_z / k_r)}{1 + (L^2 \cdot k_z / k_r)} \\ \frac{1 - (L^2 \cdot k_z / k_r)}{1 + (L^2 \cdot k_z / k_r)} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_a \\ F_b \end{pmatrix}$$

【0 0 5 5】

(数 2) の右辺の行列において、非対角成分と対角成分との比の値は (数 1) で説明した非対角性の大きさと一致している。このことから、

$$0. 5 \leq L^2 \cdot k_z / k_r \leq 2$$

の関係が満たされれば、固定電極 4 a、4 b に任意の駆動力を発生させた場合にも、その中心位置上の点 A、B における変位の干渉を 1 / 3 以下に抑え、独立制御性を高められることが判る。

【0056】

また、さらに $L^2 \cdot k_z / k_r$ が

$$1 \leq L^2 \cdot k_z / k_r$$

の条件を満たした場合には、(数2)における非対角項が負の値をとるが、この条件は静電力のように駆動力 F_a 、 F_b が吸引力しか発生しない構成において、非対角性の補正を容易にする。

【0057】

この理由を、再び図2(a)に戻って説明する。

【0058】

$$1 \leq L^2 \cdot k_z / k_r$$

の条件が満たされる場合、点Bでの非対角性による変位 δ' は負の値をとる。すなわち、点Bにおいて可動電極6は非対角性によって固定電極4bから離れる方向に変位する。このため、これを補正するには固定電極4b側で吸引力を発生すればよい。非対角性による変位 δ' が固定電極4bに近づく方向に発生する場合は、静電力のように吸引力しか発生しない構成でこれを補正するのは難しいが、非対角性による変位 δ' が固定電極4bから離れる方向に発生する場合は、基本的に駆動力 F_a 、 F_b の大きさを適切に設定すれば非対角性の補正を行うことができる。このために、非対角性の補正を行う場合においても、簡素な構成でこれを実施することができる。

【0059】

次に、図3を用いて、2軸の傾動と1軸の垂直変位を行う2次元モデルについて説明する。図3は本発明におけるマイクロアクチュエータの2次元モデルによる動作説明図である。

【0060】

図3(a)は本発明におけるマイクロアクチュエータの平面図であり、可動電極6の中央部Oを原点としてx軸、y軸を図のようにとっている。

【0061】

固定電極4a、4b、4cの駆動力の発生中心位置をそれぞれ点A、点B、点Cとする。固定電極4aと可動電極6とが平行平板電極を形成するとした第1次近似では、点Aは可動電極6と固定電極4aとがオーバーラップする部分の図心の位置と一致する。点B、点Cについても同様である。固定電極4a～4cは中央部Oを中心として回転対称に配置されているため、点A～Cはいずれも中央部Oからの距離がRとなる円周上にあり、中央部Oから見て120度の均等な角度間隔で配置されている。

【0062】

図3(b)はマイクロアクチュエータのy軸に沿った断面の模式図、図3(c)はマイクロアクチュエータのx軸に沿った断面の模式図である。固定電極4a、4b、4cがそれぞれ独立に駆動力 F_a 、 F_b 、 F_c を発生し、これによって点A、B、Cにおいて可動電極6が基板1に垂直な方向にそれぞれ δ_a 、 δ_b 、 δ_c だけ変位するものとする。

【0063】

弾性支持部5は、可動電極6の垂直変位 δ_o (m) に対してバネ定数 k_z (N/m) で復元力を発生し、可動電極6のx軸周りの傾動角度 θ_x (rad) に対してバネ定数 k_{rx} (Nm/rad) で復元トルクを発生し、可動電極6のy軸周りの傾動角度 θ_y (rad) に対してバネ定数 k_{ry} (Nm/rad) で復元トルクを発生する。

【0064】

以上のような構成において、変位 δ_a 、 δ_b 、 δ_c と駆動力 F_a 、 F_b 、 F_c との関係は(数3)で与えられる。

【0065】

【数3】

$$\begin{pmatrix} \delta a \\ \delta b \\ \delta c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{kz} + \frac{R^2}{krx} & \frac{1}{kz} - \frac{R^2}{2krx} & \frac{1}{kz} - \frac{R^2}{2krx} \\ \frac{1}{kz} - \frac{R^2}{2krx} & \frac{1}{kz} + \frac{R^2}{4krx} + \frac{3R^2}{4kry} & \frac{1}{kz} + \frac{R^2}{4krx} - \frac{3R^2}{4kry} \\ \frac{1}{kz} - \frac{R^2}{2krx} & \frac{1}{kz} + \frac{R^2}{4krx} - \frac{3R^2}{4kry} & \frac{1}{kz} + \frac{R^2}{4krx} + \frac{3R^2}{4kry} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Fa \\ Fb \\ Fc \end{pmatrix}$$

【0066】

(数3)において、 $R^2 \cdot kz / krx$ の値を2に近づけ、 krx の値を kry に近づけることで、すべての非対角成分を所望の値にまで小さくできる。このことから、可動電極6の中央部Oを支持し、弾性支持部5のバネ定数 kz 、 krx 、 kry とに特定の関係を持たせることによって、固定電極4a、4b、4cに任意の駆動力を発生させた場合に、その中心位置上の点A、B、Cにおける変位の干渉を所定値以下に抑え、独立制御性を高めることができる。

【0067】

非対角性を低減するのに必要な R 、 kz 、 krx 、 kry の条件例を(表2)に示す。

【0068】

【表2】

非対角性の大きさ	R 、 kz 、 krx 、 kry の条件例
0.33・・・ (=1/3)	$1 \leq R^2 \cdot kz / krx \leq 5$ $1 \leq R^2 \cdot kz / kry \leq 5$ $0.67 \leq krx / kry \leq 1.5$
0.25	$1.1 \leq R^2 \cdot kz / krx \leq 4$ $1.1 \leq R^2 \cdot kz / kry \leq 4$ $0.71 \leq krx / kry \leq 1.4$
0.2	$1.3 \leq R^2 \cdot kz / krx \leq 3.3$ $1.3 \leq R^2 \cdot kz / kry \leq 3.3$ $0.77 \leq krx / kry \leq 1.3$
0.1	$1.6 \leq R^2 \cdot kz / krx \leq 2.5$ $1.6 \leq R^2 \cdot kz / kry \leq 2.5$ $0.87 \leq krx / kry \leq 1.15$

【0069】

このように、弾性支持部5が可動電極6の中央部Oを支持するように設け、弾性支持部5のバネ定数 kz 、 krx 、 kry に

$$1 \leq R^2 \cdot kz / krx \leq 5、$$

$$1 \leq R^2 \cdot kz / kry \leq 5、$$

$$0.67 \leq krx / kry \leq 1.5$$

の関係を満たしているために、垂直方向への変位と2軸の傾きを含む3軸の自由度を持つマイクロアクチュエータにおいても非対角性の大きさを1/3以下に低減することができる。

【0070】

また、さらに $R^2 \cdot kz / krx$ が

$$2 \leq R^2 \cdot kz / krx、$$

$$2 \leq R^2 \cdot kz / kry$$

の条件を満たした場合には、1次元モデルで説明したのと同様に、駆動力 $Fa \sim Fc$ が吸引力しか発生しない静電力のような構成において、非対角性の補正を容易にすることができる。

【0071】

次に図4を用いて、こうした条件を満たすマイクロアクチュエータの具体的な寸法数値

について説明する。図4は本発明の実施の形態1におけるマイクロアクチュエータの平面図である。

【0072】

中央部O、点A～C、距離Rについては図3(a)で説明した内容と同一である。ここで距離Rは $37\mu\text{m}$ である。弾性支持部5の平面形状は、中央部Oから可動端5kまでの距離 H_1 を $5.5\mu\text{m}$ 、中央部Oから固定端5hまでの距離 H_2 を $45.5\mu\text{m}$ 、中央部Oから固定部5dの中心までの距離 H_3 を $51\mu\text{m}$ に設定する。また支持部5gの幅 W_1 を $11\mu\text{m}$ 、弾性梁5aの幅 W_2 を $4\mu\text{m}$ 、固定部5dの幅 W_3 を $11\mu\text{m}$ に設定する。弾性支持部5の厚さは $0.1\sim 1\mu\text{m}$ の範囲が好ましく、ここでは $0.5\mu\text{m}$ とする。弾性支持部5の材質をアルミニウム合金とした場合、縦弾性係数は 69GPa 、ポアソン比は 0.35 である。

【0073】

固定端5hから可動端5kに向けて延在する弾性梁5aの中で、互いに最も離れた2つの部分同士の直線距離として定義する距離Hは、ここでは弾性梁5aの長さ等に等しく、 $40\mu\text{m}$ である。 k_r/k_{rx} 、 k_r/k_{ry} の値はおよそ距離Hの2乗に反比例するため、距離Hを適宜調節して所望の k_z/k_{rx} 、 k_r/k_{ry} の値を得ることが可能である。距離Hと距離Rとの関係は

$$0.8 \leq H/R \leq 1.6$$

を満たすように決定するのが好ましい。上記したH、Rの値の場合($H=40\mu\text{m}$ 、 $R=37\mu\text{m}$)、 H/R の値は 1.08 となり

$$0.8 \leq H/R \leq 1.6$$

の関係を満足している。

【0074】

以上の数値を持つ弾性支持部5は、 $k_z=1.16\text{ (N/m)}$ 、 $k_{rx}=7.29\times 10^{-10}\text{ (Nm/rad)}$ 、 $k_{ry}=7.90\times 10^{-10}\text{ (Nm/rad)}$ の特性を示した。このとき、 $R^2\cdot k_z/k_{rx}$ 、 $R^2\cdot k_z/k_{ry}$ 、 k_{rx}/k_{ry} の値はそれぞれ 2.18 、 2.02 、 1.08 となるため、

$$1 \leq R^2 \cdot k_z/k_{rx} \leq 5,$$

$$1 \leq R^2 \cdot k_z/k_{ry} \leq 5,$$

$$0.67 \leq k_{rx}/k_{ry} \leq 1.5$$

の条件を満足している。これは(数3)を基に計算すると、3%以下の非対角性を与える条件であることが判る。このように、極めて非対角性が小さいマイクロアクチュエータを実現することができる。

【0075】

なお、可動電極6は1辺の長さQが $62\mu\text{m}$ であり、固定電極4および弾性支持部5は全て可動電極6の平面領域内に存在するようにしている。

【0076】

ここで、図2において1次元モデルを用いて説明した

$$0.5 \leq L^2 \cdot k_z/k_r \leq 2$$

の条件が、2次元モデルである本構成にも適用可能であることについて説明を加える。

【0077】

例えば固定電極4a、4bの2つを例にとると、これらは中央部Oを含む傾動軸Uを中心に互いに反対側に振り分けられた平面位置関係を持つ。傾動軸Uに関する復元トルク k_r は k_{rx} に等しく、傾動軸Uと点A、Bとの距離Lは $\sqrt{3}R/2$ に等しい。このとき $L^2\cdot k_z/k_r$ は 1.58 であり、

$$0.5 \leq L^2 \cdot k_z/k_r \leq 2$$

の条件を満たす。

【0078】

以上説明したように、本実施の形態によれば、弾性支持部5が可動電極6の中央部Oを支持し、可動電極6の垂直方向変位および傾動角度に応じたバネ定数に特定の関係を持た

せることによって、各固定電極の駆動力と可動電極 6 の各点での変位との間の非対角性を抑えることができる。

【0079】

なお、本実施の形態では、互いに平行平板電極対を形成する固定電極 4 と可動電極 6 とをそれぞれ駆動部と可動部としているが、本発明はこれに限定されるものではなく、駆動部が可動部に対して基板 1 と垂直な方向への駆動力を発生するものであれば何でも良い。例えば、固定電極 4 と可動電極 6 とを垂直櫛形電極対としてもよく、さらには電磁力等の静電力以外の駆動力を発生する構成でも良い。こうした駆動力は非接触力であるのが好ましいが、弾性支持部 5 が持つバネ定数 k_z 、 k_r の特定の関係に大きな外乱を与えないものであれば、接触力であっても良い。

【0080】

また、本実施の形態では 2 軸の傾動と 1 軸の垂直変位が可能なマイクロアクチュエータについて説明したが、1 次元モデルでの原理説明からも明らかなように、本発明が 1 軸の傾動と 1 軸の垂直変位が可能なマイクロアクチュエータについても適用可能であることは言うまでもない。

【0081】

また、本実施の形態のマイクロアクチュエータは中央部 O に関して対称配置された平面形状を有するが、必ずしもこれに限定されるものではない。本発明によれば、非対称性を有した構成においても、駆動力を発生しない駆動部上の点において可動部の回転に伴う変位と垂直変位とを相殺させて非対角性を小さくするという効果を得ることが可能である。

【0082】

(実施の形態 2)

図 5 を参照しながら、本発明によるマイクロアクチュエータの実施の形態 2 を説明する。図 5 は本発明の実施の形態 2 におけるマイクロアクチュエータの構成説明図である。

【0083】

図 5 (a) は同マイクロアクチュエータの平面図である。本実施の形態と実施の形態 1 との主な相違点は、弾性支持部 15 の平面形状をミアンダ (meander) 形状とし、概 180 度で梁の延在方向を折り返す折り返し部 15 n ~ 15 s を備えた点である。

【0084】

固定電極 14 a ~ 14 c は、弾性支持部 15 の占有領域を確保するために、固定電極 4 a ~ 4 c に比べて面積が小さくなっており、その中心位置である点 A ~ C も中央部 O からより離れた $R = 39 \mu\text{m}$ の位置に移動している。

【0085】

弾性支持部 15 の弾性梁 15 a を例にとってその平面形状を説明する。弾性梁 15 a は、概 180 度で梁の延在方向を折り返す 2 つの折り返し部 15 n、15 o を持つミアンダ形状をしている。弾性梁 15 a をミアンダ形状にすることで、実質的な梁長さを長くしてバネ定数 k_z 、 k_{rx} 、 k_{ry} を小さくし、低電圧駆動で大きな変位を得られるようにする。

【0086】

中央部 O から可動端 15 k までの距離 H_1 は $5.5 \mu\text{m}$ 、中央部 O から固定端 15 h までの距離 H_2 は $51.5 \mu\text{m}$ 、中央部 O から固定部 15 d の中心までの距離 H_3 を $57 \mu\text{m}$ に設定する。また支持部 15 g の実効幅 W_1 を $13 \mu\text{m}$ 、弾性梁 15 a の幅 W_2 を $3 \mu\text{m}$ 、固定部 15 d の幅 W_3 を $11 \mu\text{m}$ に設定する。弾性支持部 15 の厚さは $0.1 \sim 1 \mu\text{m}$ の範囲が好ましく、ここでは $0.5 \mu\text{m}$ とする。弾性支持部 15 の材質をアルミニウム合金とした場合、縦弾性係数は 69 GPa 、ポアソン比は 0.35 である。

【0087】

弾性梁 15 a の中で互いに最も離れた 2 つの部分同士の距離 H は、固定端 15 h と可動端 15 k との直線距離に等しく、 $46 \mu\text{m}$ である。これらの H 、 R の値の場合 ($H = 46 \mu\text{m}$ 、 $R = 39 \mu\text{m}$)、 H/R の値は 1.18 となり

$$0.8 \leq H/R \leq 1.6$$

の関係を満足している。

【0088】

弾性梁 15a の梁の全長は $120\mu\text{m}$ であり、距離 H の 2.61 倍である。

【0089】

固定部 15d ~ 15f は、隣接するマイクロアクチュエータの固定部と接続して一体化されている。弾性支持部 15 の支持部 15g では、斜線部で示した 3 箇所において可動電極 16 と接続している。接続箇所を 3 箇所にしたのは可動電極 16 と弾性支持部 15 との接続強度を高めるためである。接続箇所の位置は概ね中央部 O であればどこでもよい。可動電極 16 の 1 辺の長さ Q は $62\mu\text{m}$ である。

【0090】

上記の数値を持つ弾性支持部 15 は、 $k_z = 0.34\text{ (N/m)}$ 、 $k_{rx} = 2.34 \times 10^{-10}\text{ (Nm/rad)}$ 、 $k_{ry} = 2.57 \times 10^{-10}\text{ (Nm/rad)}$ の特性を示した。このとき、 $R^2 \cdot k_z / k_{rx}$ 、 $R^2 \cdot k_z / k_{ry}$ 、 k_{rx} / k_{ry} の値はそれぞれ 2.19、2.00、1.10 をとるため、

$$1 \leq R^2 \cdot k_z / k_{rx} \leq 5、$$

$$1 \leq R^2 \cdot k_z / k_{ry} \leq 5、$$

$$0.67 \leq k_{rx} / k_{ry} \leq 1.5$$

の条件を満足している。

【0091】

以上のように構成したマイクロアクチュエータについて、弾性梁 15a ~ 15c をミアンダ形状にした効果を、直線形状にした場合と比較して説明する。

【0092】

直線形状の場合、弾性梁のバネ定数を下げるために長さを n 倍に伸ばすと、傾動角度に対するバネ定数 k_r (x、y 軸別に表示した場合は k_{rx} 、 k_{ry}) はおよそ $1/n$ となり、垂直変位に対するバネ定数 k_z はおよそ $1/n^3$ となる。従って、両者の比の値である k_z / k_r はおよそ $1/n^2$ の特性を示す。すなわち、n の増加につれて k_z / k_r の値は急速に減少し、

$$0.5 \leq L^2 \cdot k_z / k_r \leq 2 \text{ あるいは}$$

$$1 \leq R^2 \cdot k_z / k_{rx} \leq 5、$$

$$1 \leq R^2 \cdot k_z / k_{ry} \leq 5$$

の条件を満たすことが非常に難しくなる。

【0093】

これに対し、ミアンダ形状の場合は

$$0.8 \leq H/R \leq 1.6$$

の条件を満たすように距離 H の大きさはおおよそ保ったまま、複数回の折り返しにより実質的な梁の全長を n 倍にする。この場合、傾動角度に対するバネ定数 k_r (x、y 軸別に表示した場合は k_{rx} 、 k_{ry}) がおよそ $1/n$ となると共に、垂直変位に対するバネ定数 k_z もおよそ $1/n$ となる。従って、両者の比の値である k_z / k_r はおよそ n に大きく依存せずほぼ一定となり、折り返し数を増やすだけで、

$$0.5 \leq L^2 \cdot k_z / k_r \leq 2 \text{ あるいは}$$

$$1 \leq R^2 \cdot k_z / k_{rx} \leq 5、$$

$$1 \leq R^2 \cdot k_z / k_{ry} \leq 5$$

の関係を満たしたままバネ定数を小さくすることができる。

【0094】

ミアンダ形状の場合に、垂直変位に対するバネ定数 k_z が $1/n^3$ でなく、 $1/n$ に比例して変化する理由を図 5 (b) を用いて説明する。

【0095】

図 5 (b) は、折り返し部 15o 周辺の弾性梁 15a の拡大図である。上側には平面図、下側には側面図を記載している。

【0096】

折り返し部 15 o における弾性梁 15 a の撓み角を ψ とし、点 S_1 から S_2 に至る微小変位 Δx に対する垂直変位の変化量 $\Delta \varepsilon$ ($S_1 \rightarrow S_2$) を考えると、これは $\psi \Delta x$ となる。

【0097】

また、点 S_3 から S_4 に至る微小変位 ($-\Delta x$) に対する垂直変位の変化量 $\Delta \varepsilon$ ($S_3 \rightarrow S_4$) においては ($-\psi \Delta x$) の項が存在するため、点 S_1 から S_4 に至る垂直変位を考えた場合 ψ の項は相殺されてより高次の $\Delta \psi \Delta x$ の項が残る。

【0098】

このように、折り返し部で弾性梁の延在方向を反転させているために、弾性梁の撓み成分による垂直変位が一部相殺されて小さくなる。この結果、バネ定数 k_z を $1/n^3$ よりも $1/n$ の特性に近づけることができる。

【0099】

以上説明したように、本実施の形態によれば、弾性支持部 15 が梁の延在方向を反転させる折り返し部 15 n ~ 15 s を備えているために、弾性支持部 15 の垂直変位に対するバネ定数 k_z と傾動角度に対するバネ定数 k_r との比の値を大きく変えることなく、低剛性化を図ることができる。これによって、各固定電極 14 a ~ 14 c の駆動力と可動電極 16 の各点 A ~ C での変位との間の非対角性を抑える効果と低電圧駆動で大きな変位を得る効果を両立して奏することができる。

【0100】

(実施の形態 3)

図 6 を参照しながら、本発明によるマイクロアクチュエータの実施の形態 3 を説明する。図 6 は本発明の実施の形態 3 におけるマイクロアクチュエータの構成説明図である。

【0101】

図 6 (a) は同マイクロアクチュエータの平面図である。本実施の形態と実施の形態 2 との主な相違点は、弾性支持部 25 の固定端 25 h ~ 25 j を折り返し部 25 n ~ 25 p よりも中央部 O に近い位置に配置した点である。

【0102】

固定電極 24 a ~ 24 c は、その中心位置である点 A ~ C が中央部 O からの距離 $R = 38.5 \mu m$ の位置にある。

【0103】

弾性支持部 25 の弾性梁 25 a を例にとってその平面形状を説明する。弾性梁 25 a は、概 180 度で梁の延在方向を折り返す奇数個 (ここでは 1 つ) の折り返し部 25 n を持つミランダ形状をしている。

【0104】

中央部 O から可動端 25 k までの距離 H_1 は $6 \mu m$ 、中央部 O から固定端 25 h までの距離 H_2 は $17.5 \mu m$ 、中央部 O から固定部 25 d の中心までの距離 H_3 を $10 \mu m$ に設定する。また支持部 25 g の実効幅 W_1 を $9 \mu m$ 、弾性梁 25 a の幅 W_2 を $3 \mu m$ に設定する。弾性支持部 25 の厚さは $0.1 \sim 1 \mu m$ の範囲が好ましく、ここでは $0.5 \mu m$ とする。弾性支持部 25 の材質をアルミニウム合金とした場合、縦弾性係数は $69 GPa$ 、ポアソン比は 0.35 である。

【0105】

弾性梁 25 a の中で互いに最も離れた 2 つの部分同士の距離 H は $41.5 \mu m$ であり、本実施の形態では可動端 25 k と折り曲げ部 25 n との距離がこれに相当する。これらの H 、 R の値の場合 ($H = 41.5 \mu m$ 、 $R = 38.5 \mu m$)、 H/R の値は 1.08 となり

$$0.8 \leq H/R \leq 1.6$$
の関係を満足している。

【0106】

弾性梁 25 a の梁の全長は $74.5 \mu m$ であり、距離 H の 1.8 倍である。

【0107】

上記の数値を持つ弾性支持部25は、 $k_z = 0.55$ (N/m)、 $k_{rx} = 3.70 \times 10^{-10}$ (Nm/rad)、 $k_{ry} = 4.08 \times 10^{-10}$ (Nm/rad) の特性を示した。このとき、 $R^2 \cdot k_z / k_{rx}$ 、 $R^2 \cdot k_z / k_{ry}$ 、 k_{rx} / k_{ry} の値はそれぞれ2.20、2.00、1.10をとるため、

$$1 \leq R^2 \cdot k_z / k_{rx} \leq 5、$$

$$1 \leq R^2 \cdot k_z / k_{ry} \leq 5、$$

$$0.67 \leq k_{rx} / k_{ry} \leq 1.5$$

の条件を満足している。

【0108】

以上のように構成したマイクロアクチュエータについて、弾性支持部25の固定端25h～25jを折り返し部25n～25pよりも中央部Oに近い位置に配置した効果を図6(b)を用いて説明する。

【0109】

図6(b)は、弾性支持部25に反りがある場合を示す模式側面図である。

【0110】

弾性支持部25は、例えば成膜プロセス時の残留応力勾配等により、反りを発生することがある。この反りの影響により支持部25gと固定部25dとの垂直方向の高さ誤差 Δz が生じる。この反りの曲率半径を ρ とすると、 Δz は近似的に

$$\Delta z = H_3^2 / (2\rho)$$

のように表される。

【0111】

従って、中央部Oから固定部25dの中心までの距離 H_3 を小さくするほど、高さ誤差 Δz はその自乗に比例して小さくすることができる。これは、弾性支持部25の固定端25h～25jを折り返し部25n～25pよりも中央部Oに近い位置に配置することで可能となる。

【0112】

以上説明したように、本実施の形態によれば、弾性支持部25の固定端25h～25jを折り返し部25n～25pよりも中央部Oに近い位置に配置しているために、例えば成膜プロセス時の残留応力勾配等により弾性支持部25に反りが発生した場合にも可動電極6の垂直方向の高さ誤差 Δz を小さく抑えることができる。むしろ、実施の形態2で説明した駆動力と変位との間の非対角性を抑える効果と低電圧駆動で大きな変位を得る効果をも両立して奏することができることは言うまでもない。

【0113】

(実施の形態4)

図7～図9を参照しながら、本発明によるマイクロアクチュエータを含む物品の実施の形態を説明する。この物品は、制御回路42(制御部)を備え、可動電極6を任意の姿勢に変位させて、可動電極6のミラー部6bに入射した光の波面を変調する。本実施の形態では、この物品とは、例えば光ディスクへの記録再生を行う光ピックアップまたは光ディスク装置を指すことを含んでいる。

【0114】

まず、図7を参照する。図7は本発明によるマイクロアクチュエータを備えた物品の概略構成図である。

【0115】

GaNレーザ等の光源31から出射された光ビームは、コリメータレンズ32により無限系の光ビームに変換され、偏光ビームスプリッタ33に入射する。この光ビームのうちP偏光成分だけが偏光ビームスプリッタ33を透過し、残りのS偏光成分は反射されて図示しない前光モニターに入射する。透過したP偏光成分は1/4波長板34によって円偏光に変換される。

【0116】

マイクロアクチュエータ35は、本発明の実施の形態1で説明した構成を備える。すな

わち、可動電極 6 は 2 次元アレイ状に複数が配列され、各可動電極 6 がミラー部 6 b を備えている。各可動電極 6 は弾性支持部 5 によって支持され、複数の固定電極 4 によって基板 1 に対する垂直方向および／または 2 軸の傾斜方向に変位する。これにより、光ビームの波面を局所的に変化させている。マイクロアクチュエータ 3 5 に対する光の入射角、出射角は、それぞれ 4 5 度に設定されている。

【0117】

マイクロアクチュエータ 3 5 によって波面が変化した光ビームは、対物レンズ 3 6 によってディスク 3 7 の記録層上に集光される。対物レンズ 3 6 は、対物レンズアクチュエータ 3 8 により光ビームの光軸方向および光軸に直交する方向の 2 方向に平行移動可能に構成されており、所望の記録層への合焦と、所望の記録トラックへの追従が出来るようになっている。

【0118】

ディスク 3 7 は、所定の間隔で配置された複数の記録層と、記録層を覆って保護する光透過可能な基材部からなる光記録媒体である。往復路での奇対称収差の収差情報消失を防止するため、記録層には拡散性もしくは蛍光性を持たせることがより好ましい。ディスク 3 7 の記録層で反射された光ビームは、再度マイクロアクチュエータ 3 5 と 1/4 波長板 3 4 とを通過する。この光ビームは大半が S 偏光成分であるため、偏光ビームスプリッタ 3 3 によって反射され、ホログラム 3 9、レンズ 4 0、光検出器 4 1 によって構成される波面情報検出部により波面に関わる情報を検出される。この波面情報検出部は、ここではモーダル型の波面センサとして説明するが、シャック＝ハルトマン (Shack-Hartmann) 型の波面センサやあるいは特開 2000-155979 号公報に記載されたような他の収差検出方法を用いても良い。モーダル型の波面センサについては下記のような公知技術がある。

【0119】

M. A. A. Neil, M. J. Booth, and T. Wilson, "New modal wave-front sensor: a theoretical analysis," J. Opt. Soc. Am. A / Vol. 17, No. 6, pp. 1098 - 1107 (2000)

ホログラム 3 9 は n (n は複数) 個の直交する収差モード M_i ($i = 1 \sim n$) について、それぞれ異なる方向に ± 1 次光を生成する。各モード M_i に対応するこれらの ± 1 次光には、予め定められたバイアス係数を B_i として、 $+1$ 次光には $+B_i M_i$ 、 -1 次光には $-B_i M_i$ のバイアス収差が付与される。

【0120】

レンズ 4 0 は、ホログラム 3 9 によって偏向された n 対の光ビームを光検出器 4 1 上に集光する。レンズ 4 0 の焦点距離を f とすると、ホログラム 3 9 と光検出器 4 1 とはそれぞれレンズ 4 0 の主平面より距離 f の位置に配置され、レンズ 4 0 はフーリエ変換レンズとして作用する。

【0121】

光検出器 4 1 は各 n 対について ± 1 次光の強度信号の差動出力 S_i を生成する。収差モード M_i に対応した差動出力 S_i は収差モード M_i の大きさ A_i に対応する信号となる。収差モード M_i に対する感度 S_i / A_i はバイアス係数 B_i 等の設計パラメータにより予め決定されている。

【0122】

これらの出力 S_i の大きさが、光ビームの波面の情報を表している。ここでは、 S_1 はディスク 3 7 の基材厚変化に伴う球面収差モード、 S_2 はディスク 3 7 のラジアル方向の傾きに伴うコマ収差を主とする収差モード、 S_3 はディスク 3 7 のタンジェンシャル方向の傾きに伴うコマ収差を主とする収差モード、 S_4 は対物レンズ 3 6 のデフォーカスによる収差モードに関わる出力信号である。また、 S_5 はディスク 3 7 のプリピットおよび記録マークによって変調された信号である。

【0123】

光源 3 1、コリメータレンズ 3 2、偏光ビームスプリッタ 3 3、1/4 波長板 3 4、マイクロアクチュエータ 3 5、対物レンズ 3 6、対物レンズアクチュエータ 3 8、ホログラ

ム 39、レンズ 40、光検出器 41 は図示しない光ピックアップ基台上に配置されている。

【0124】

制御回路 42 は、波面演算部 43、レンズシフト補正演算部 44、全体制御部 45、波面補正制御部 46 とを備える。

【0125】

波面演算部 43 は、光検出器 41 の出力信号 $S_1 \sim S_3$ を用いて、ディスク 37 の基材厚変化と傾きに伴う波面収差を補正するための位相関数 $\psi(x, y)$ を算出する。ここで x, y はマイクロアクチュエータ 35 のミラー位置に対応した座標である。

【0126】

レンズシフト補正演算部 44 は、全体制御部 45 から対物レンズ 36 のレンズシフト量 x_0 を入力し、これに基づき波面演算部 43 から入力した位相関数 $\psi(x, y)$ を $\psi(x - x_0, y)$ に変換する。この $\psi(x - x_0, y)$ が、波面補正制御部 46 がマイクロアクチュエータ 35 を制御する際の目標波面となる。

【0127】

全体制御部 45 は、光検出器 41 から入力した S_4, S_5 を基に、対物レンズアクチュエータ 38 へのフォーカス制御信号 F_0 、トラッキング制御信号 T_r を作成する。また、このトラッキング制御信号 T_r に低域通過フィルタを通過させることにより、対物レンズ 36 のレンズシフト量 x_0 を算出している。

【0128】

波面補正制御部 46 は、レンズシフト補正演算部 44 からの出力 $\psi(x - x_0, y)$ に基づいてマイクロアクチュエータ 35 の各可動電極 6 の変位および傾きを制御するための制御信号 D を出力する。制御信号 D は 42×36 個の単位セルに各 3 つずつある固定電極 4a ~ 4c のそれぞれに与えるべき駆動電圧の大きさを示すデータである。駆動電圧は、可動電極 6 の対応する各点で 3 段階以上の多段階（例えば 128 段階 = 7 bit）の変位が得られるように設定される。固定電極に与える駆動電圧と可動電極の変位とは一般的に非線形な関係があるので、制御信号 D はより高い分解能（例えば 10 bit）を持たせて、リニアな変位が得られるような補正処理を行っている。各固定電極への制御信号 D は時系列に切り替えられる。

【0129】

可動電極 6 の対応する各点での目標変位量の段階を n 段階としたとき、非対角性の大きさ δ' / δ が $1/n$ 以下であれば、波面補正制御部 46 は全く非対角性の補正を行う必要がないため、極めて制御構成を簡単にすることができる。

【0130】

あるいは非対角性の補正を行う場合は、可動電極 6 の各点の目標変位量に（数 3）の右辺にある行列の逆行列を掛ける操作を行い、固定電極 4a ~ 4c に発生させる駆動力を求め、さらにこれを駆動電圧に変換して制御信号 D を作成する。この場合でも、マイクロアクチュエータ 35 の非対角性が従来に比べてそもそも低減されているので、補正精度が得られやすく、個々のアクチュエータ特性のばらつきの影響による非線形補正の精度劣化も小さい。またマイクロアクチュエータ 35 が

$$2 \leq R^2 \cdot k_z / k_{rx}$$

$$2 \leq R^2 \cdot k_z / k_{ry}$$

を満足しているために、例えば上記の逆行列演算を行った場合でも、駆動力は正（吸引方向）の値の範囲内に解が求められ、静電力のように吸引方向にしか駆動力が発生しない場合においても、波面補正制御部 46 は非対角性の補正を容易に行うことができる。

【0131】

最後に、図 8 および図 9 を用いて、マイクロアクチュエータ 35 の波面近似精度を向上させるための固定電極 4 の中心点の座標位置について説明を行う。

【0132】

本実施の形態のマイクロアクチュエータ 35 は 2 軸の傾動と 1 軸の垂直変位が可能なも

のであるが、説明の順序として、まず1軸の傾動と1軸の垂直変位を行う1次元モデルについて説明し、次いで2軸の傾動と1軸の垂直変位を行う2次元モデルについて説明する。

【0133】

図8は、マイクロアクチュエータの駆動中心点の座標位置と波面近似精度との関係を示す1次元モデルの説明図である。

【0134】

まず、図8(a)を用いて一般的な波面の折れ線近似方法を説明する。

【0135】

図8(a)において、横軸はマイクロアクチュエータ35のx方向の座標位置であり、縦軸は波面の位相である。マイクロアクチュエータ35で補正目標となる位相関数 ψ が2点鎖線で示されている。位相関数 ψ は既に説明したように座標位置xの関数形で与えられている。マイクロアクチュエータ35の各ミラー部6bは、基板1に対する変位と傾きとが制御可能であるから、この位相関数 ψ を折れ線近似で再現することになる。各ミラー部6bの隣接ピッチ間隔をPとすると、間隔P毎に座標点 x_j (j は整数)をとり、隣接する2つの座標点 x_j 、 x_{j+1} に対する位相関数 ψ の値 $\psi(x_j)$ 、 $\psi(x_{j+1})$ を結ぶようにミラー部6bの変位と傾きを求めることができる。この近似折れ線 ψ' を実線で示す。この方法は演算量が少なく高速な計算処理が可能であるが、波面誤差が大きい。

【0136】

別の折れ線近似方法として、区間 $[x_j, x_{j+1}]$ 毎に、位相関数 ψ からの誤差を最小にする変位と傾きとを最小自乗法で求めることが可能である。この方法によれば、波面誤差を小さくできるが、演算量が多くなる。

【0137】

そこで、図8(b)を用いて、少ない演算量で精度を向上させた波面の折れ線近似方法を説明する。ここでは、区間 $[x_j, x_{j+1}]$ 内に2点の座標点 x_j, a, x_j, b をとる。座標点 x_j, a, x_j, b は各ミラー部6bの中央部 O_j に関して対称の位置にあり、どちらも中央部 O_j から距離Lだけ離れた位置にある。この距離Lの値を適切な値に設定し、光反射面を座標 $(x_j, a, \psi(x_j, a))$ と $(x_j, b, \psi(x_j, b))$ との2点を通る線分として規定することを考える。

【0138】

図8(c)は区間 $[x_j, x_{j+1}]$ における位相関数 ψ の曲率半径 ρ と波面誤差を極小にする距離Lの値との関係をプロットしている。ミラーの大きさを隣接ピッチPとほぼ等しいとして、無次元化した曲率半径 ρ/P を横軸にとり、波面誤差を極小にする無次元化した距離 L/P を縦軸にとっている。波面誤差は長さPのミラー内における誤差の自乗の定積分値 $\int (\psi - \psi')^2 dx$ の平方根として定義される。位相関数 ψ の曲率半径 ρ は任意の値をとり得るが、図8(c)から、波面誤差を極小にする無次元距離 L/P は、ほとんど無次元曲率半径 ρ/P に依存せず、約0.29と一定の値をとることがわかる。従って、距離 $L = 0.29P$ と設定した座標点 x_j, a, x_j, b をマイクロアクチュエータ35の駆動中心点の座標位置と一致させ、各駆動点の変位目標値を $\psi(x_j, a)$ 、 $\psi(x_j, b)$ とすれば、最小自乗法を用いた方法と同程度に波面誤差を極小化することができ、さらに駆動中心点の変位目標値を位相関数 ψ から直接計算できるために、極めて演算量を低減できる。

【0139】

上記の事項を2次元モデルに拡張した場合について、図9を参照しながら説明する。図9は、マイクロアクチュエータの駆動中心点の座標位置と波面近似精度との関係を示す2次元モデルの説明図である。

【0140】

図9(a)は、マイクロアクチュエータ35の平面図であり、中央部O、点A~C、距離Rの意味は実施の形態1で説明した内容と同一である。互いに隣接するミラー部6b同士のピッチを距離Pとする。ここでは、ミラー部6bの1辺の長さQは $(P/\sqrt{3})$ に等

しいと近似し、隣接するミラー部 6 b との間のギャップを無視している。

【0141】

図 9 (b) はミラー部 6 b 内における位相関数 ψ の曲率半径 ρ と波面誤差を極小にする距離 R の値との関係をプロットしている。

【0142】

図 9 (b) の横軸には無次元化した曲率半径 ρ/P をとり、縦軸には波面誤差を極小にする無次元化した無次元距離 R/P をとっている。波面誤差は正六角形ミラー面内における誤差の自乗の定積分値 $\iint (\psi - \psi')^2 dx dy$ の平方根として定義される。

【0143】

位相関数 ψ を球面とした場合の結果を実線で示す。波面誤差を極小にする無次元距離 R/P は、ほとんど無次元曲率半径 ρ/P に依存せず、約 0.37 と一定の値をとることがわかる。また、先程の 1 次元モデルでの結果を点線で併記している。これは、位相関数 ψ が x 方向にのみ曲率を持ち y 方向に曲率を持たない円筒面の場合にほぼ相当するが、既に説明したように無次元距離 R/P は約 0.29 である。位相関数 ψ が球面の場合を扁平率 0、位相関数 ψ が円筒面の場合を扁平率 1 とすれば、一般的な波面はこの中間の扁平率を持つ。従って、図の斜線部で示したように、無次元距離 R/P の範囲を 0.29 以上 0.37 以下とすれば良いことが判る。

【0144】

このように、固定電極 4 a ~ 4 c の駆動力の発生中心である点 A ~ C と中央部 O との距離 R と隣接ミラー間とのピッチ距離 P とに

$$0.29 \leq R/P \leq 0.37$$

の関係を与えることにより、波面誤差の近似精度を高めることができる。

【0145】

本実施の形態では $R = 37 \mu\text{m}$ 、 $P = 110 \mu\text{m}$ としているため、 R/P の値は 0.336 であり

$$0.29 \leq R/P \leq 0.37$$

の関係を満足している。このような配置関係をとるために、点 A ~ C の変位目標値は位相関数 ψ の関数に各駆動点の座標位置 (x , y) を入力して直接計算するだけでよく、波面補正制御部 46 の演算量を極めて少なくすることができる。

【産業上の利用可能性】

【0146】

本発明のマイクロアクチュエータ、および当該マイクロアクチュエータを備えた物品は、収差補正、光走査、分光等の各種用途の光デバイス及び光装置として有用である。

【0147】

また、チューナブルキャパシタ等の高周波回路用途、可変流路等の流体制御用途等にも応用できる。

【図面の簡単な説明】

【0148】

【図 1】 本発明の実施の形態 1 におけるマイクロアクチュエータの分解斜視図

【図 2】 本発明におけるマイクロアクチュエータの 1 次元モデルによる動作説明図

【図 3】 本発明におけるマイクロアクチュエータの 2 次元モデルによる動作説明図

【図 4】 本発明の実施の形態 1 におけるマイクロアクチュエータの平面図

【図 5】 本発明の実施の形態 2 におけるマイクロアクチュエータの構成説明図

【図 6】 本発明の実施の形態 3 におけるマイクロアクチュエータの構成説明図

【図 7】 本発明によるマイクロアクチュエータを備えた物品の概略構成図

【図 8】 マイクロアクチュエータの駆動中心点の座標位置と波面近似精度との関係を示す 1 次元モデルの説明図

【図 9】 マイクロアクチュエータの駆動中心点の座標位置と波面近似精度との関係を示す 2 次元モデルの説明図

【図 10】 従来例におけるマイクロアクチュエータの斜視図

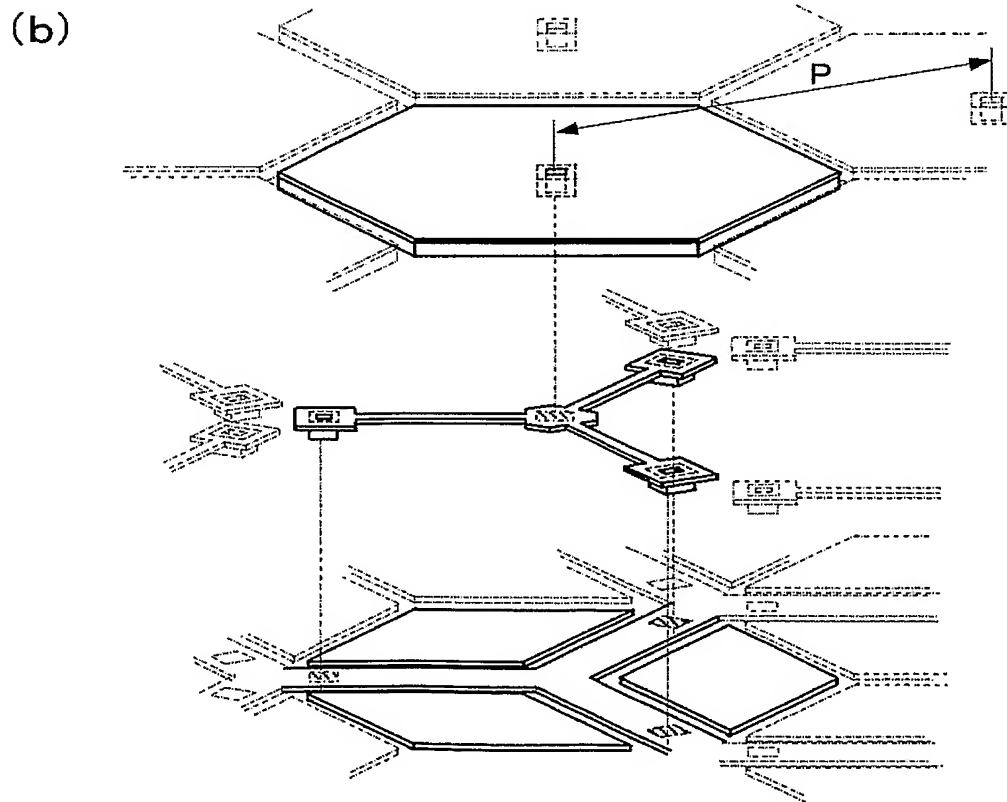
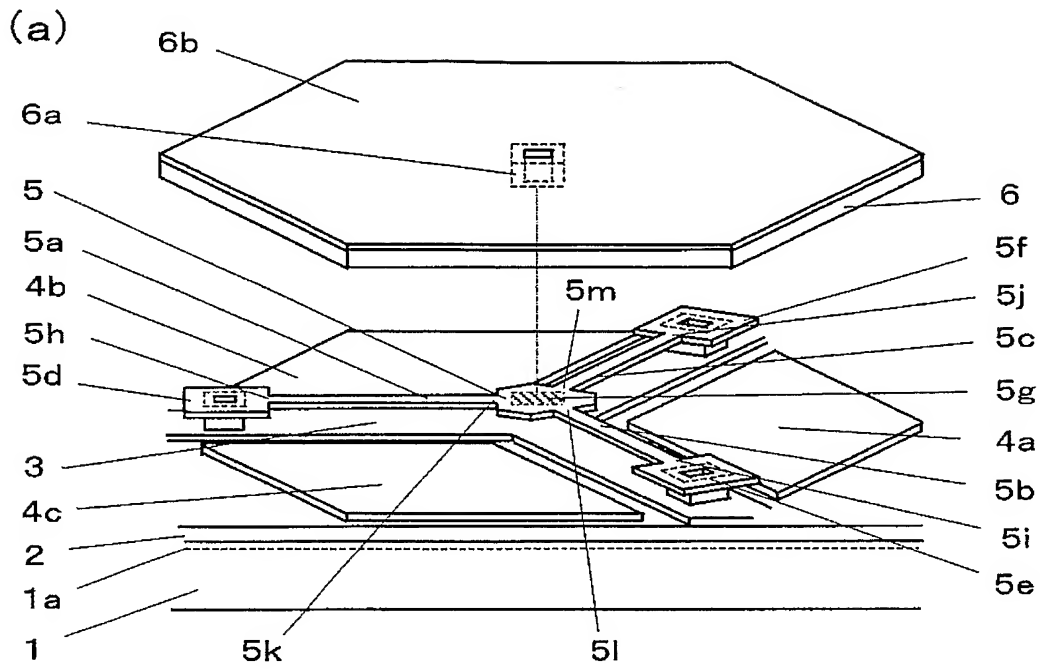
【図 11】従来例におけるマイクロアクチュエータの動作説明図
【符号の説明】

【0149】

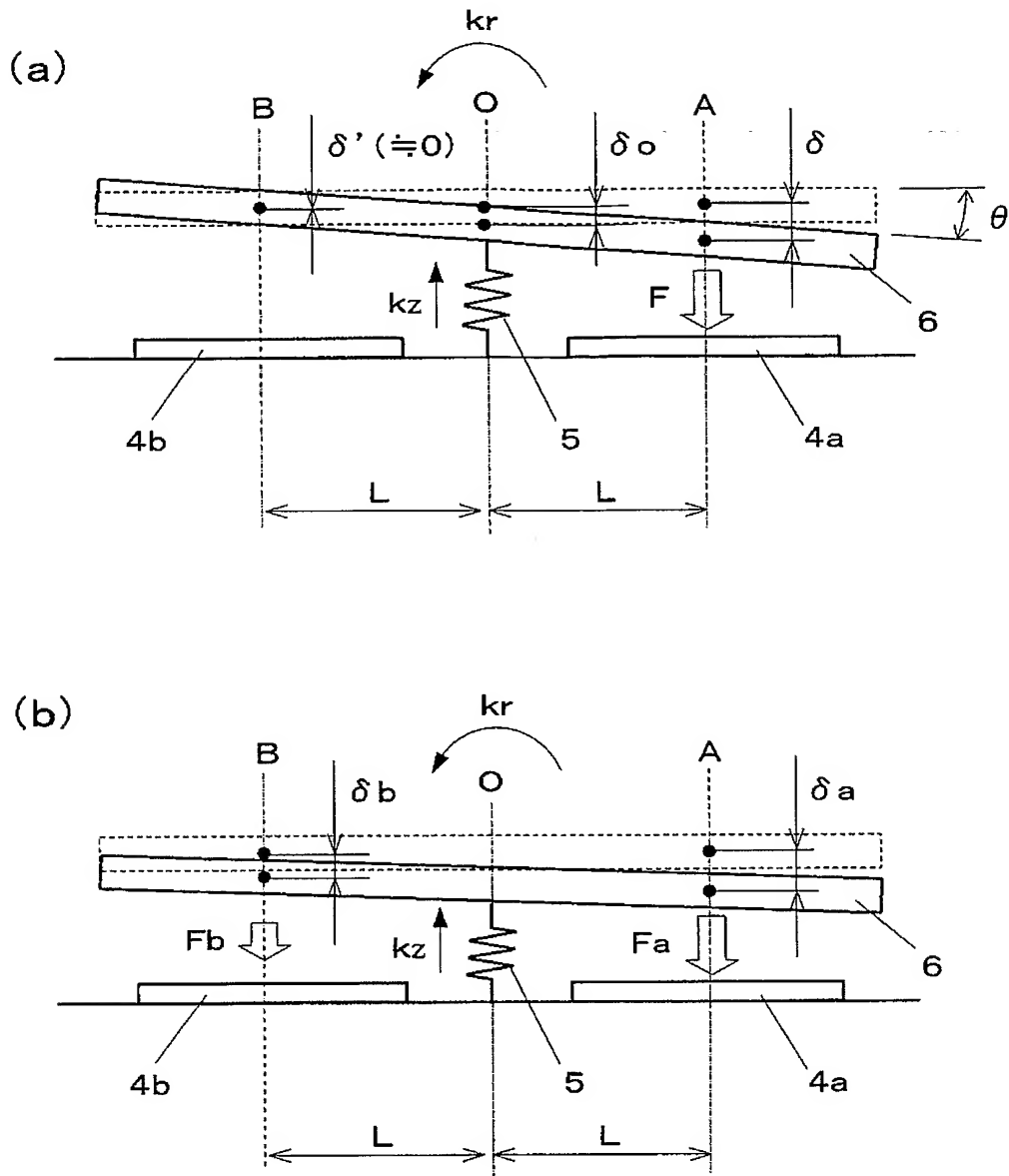
- 1 基板
- 4a~4c, 14a~14c, 24a~24c 固定電極
- 5, 15, 25 弾性支持部
- 5a, 15a, 25a 弾性梁
- 5h~5j, 15h~15j, 25h~25j 固定端
- 5k~5m, 15k~15m, 25k~25m 可動端
- 15n~15s, 25n~25p 折り返し部
- 6, 16 可動電極
- 31 光源
- 41 光検出器
- 42 制御回路

【書類名】 図面

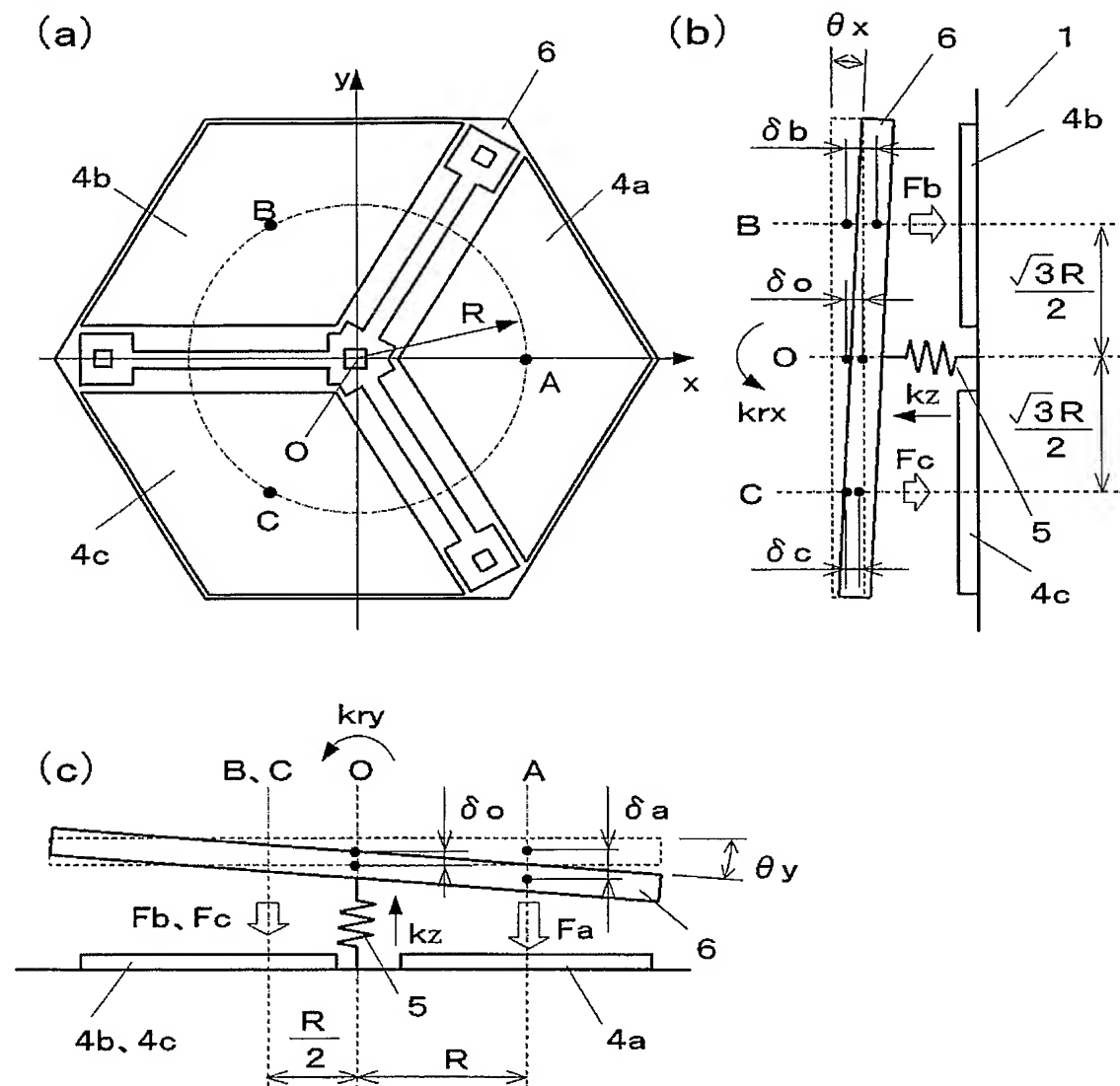
【図 1】



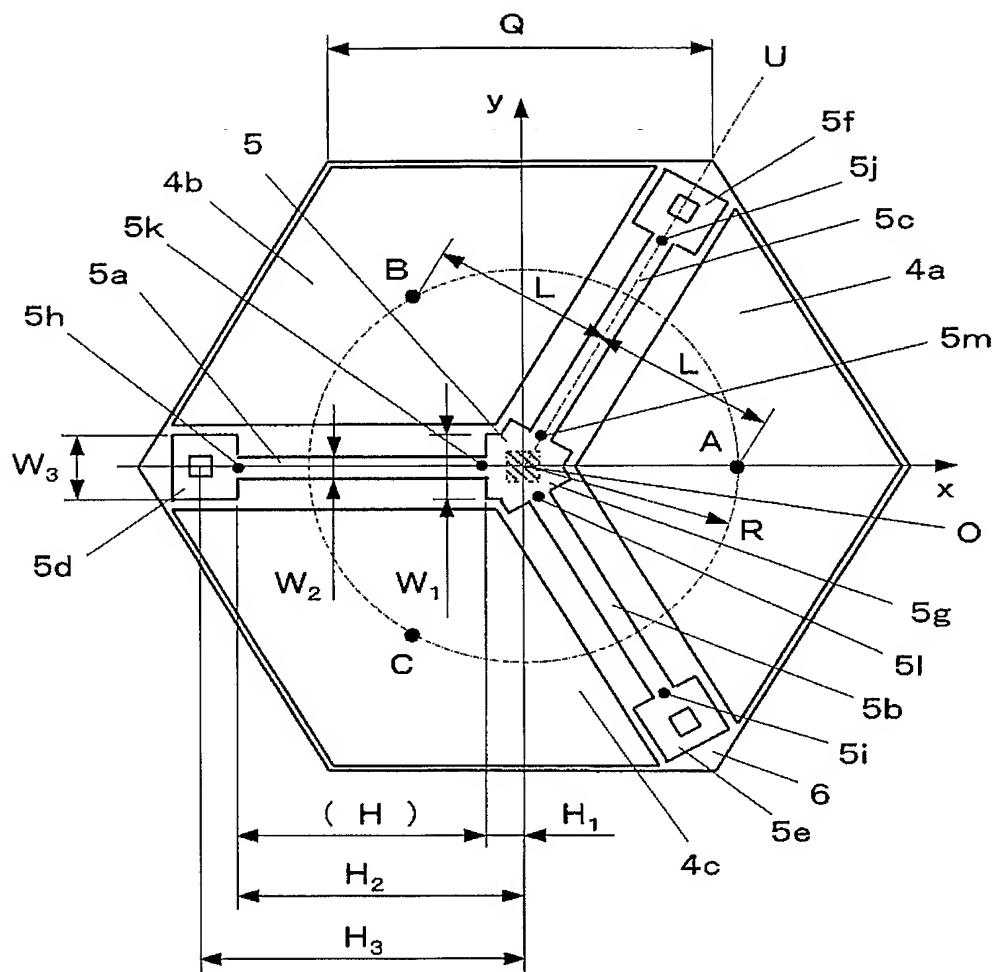
【図 2】



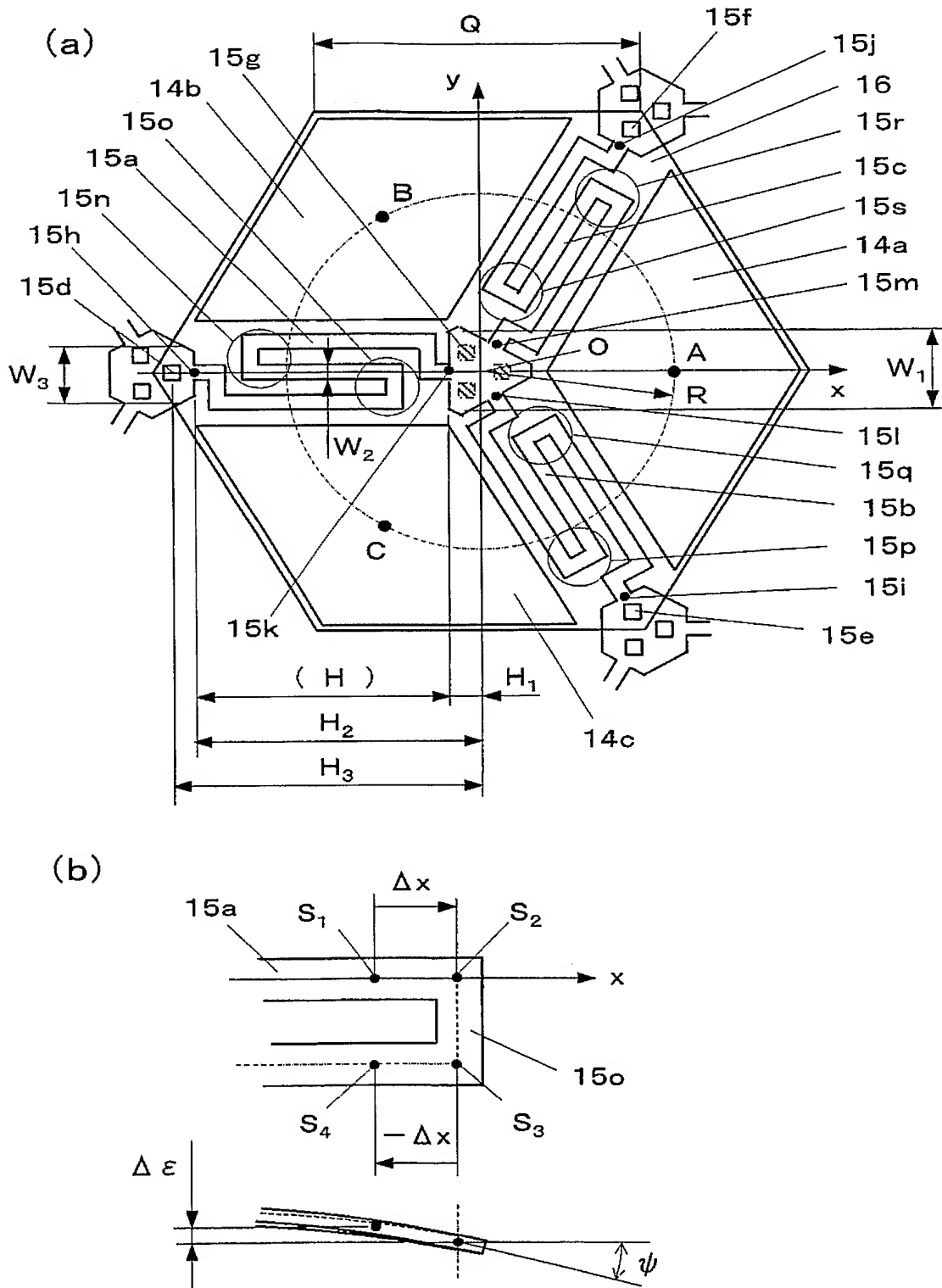
【図 3】



【図 4】

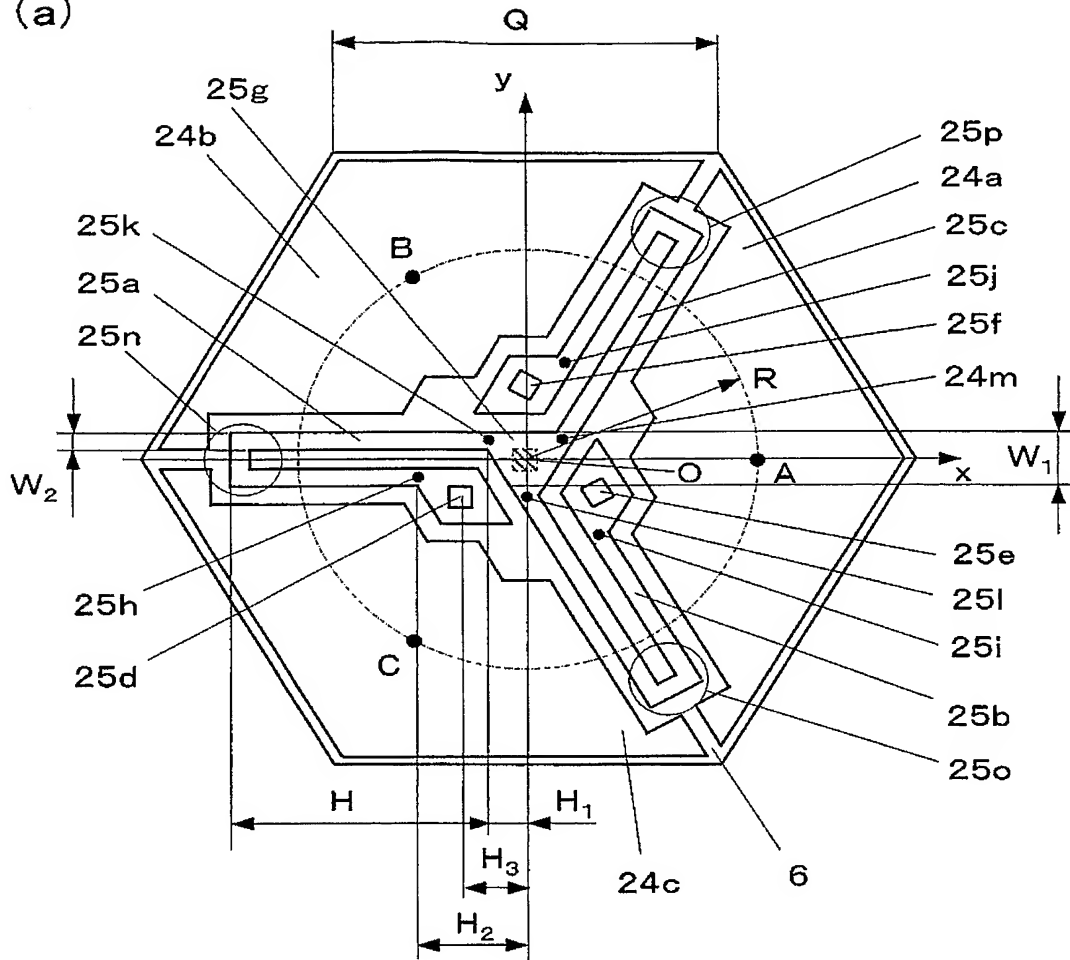


【図 5】

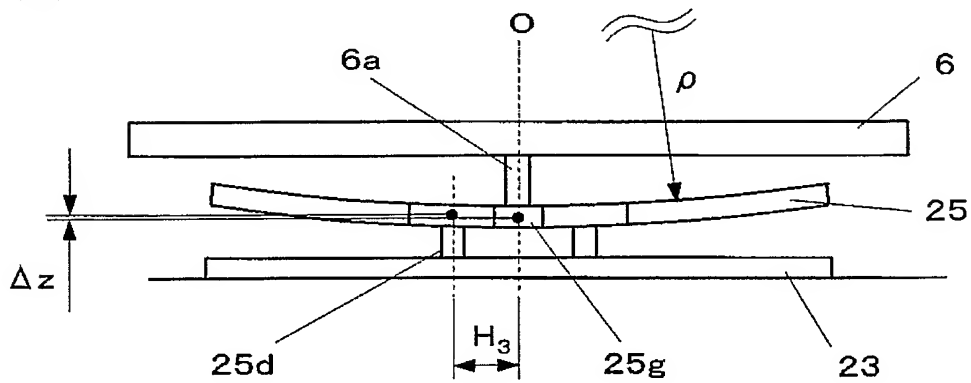


【図 6】

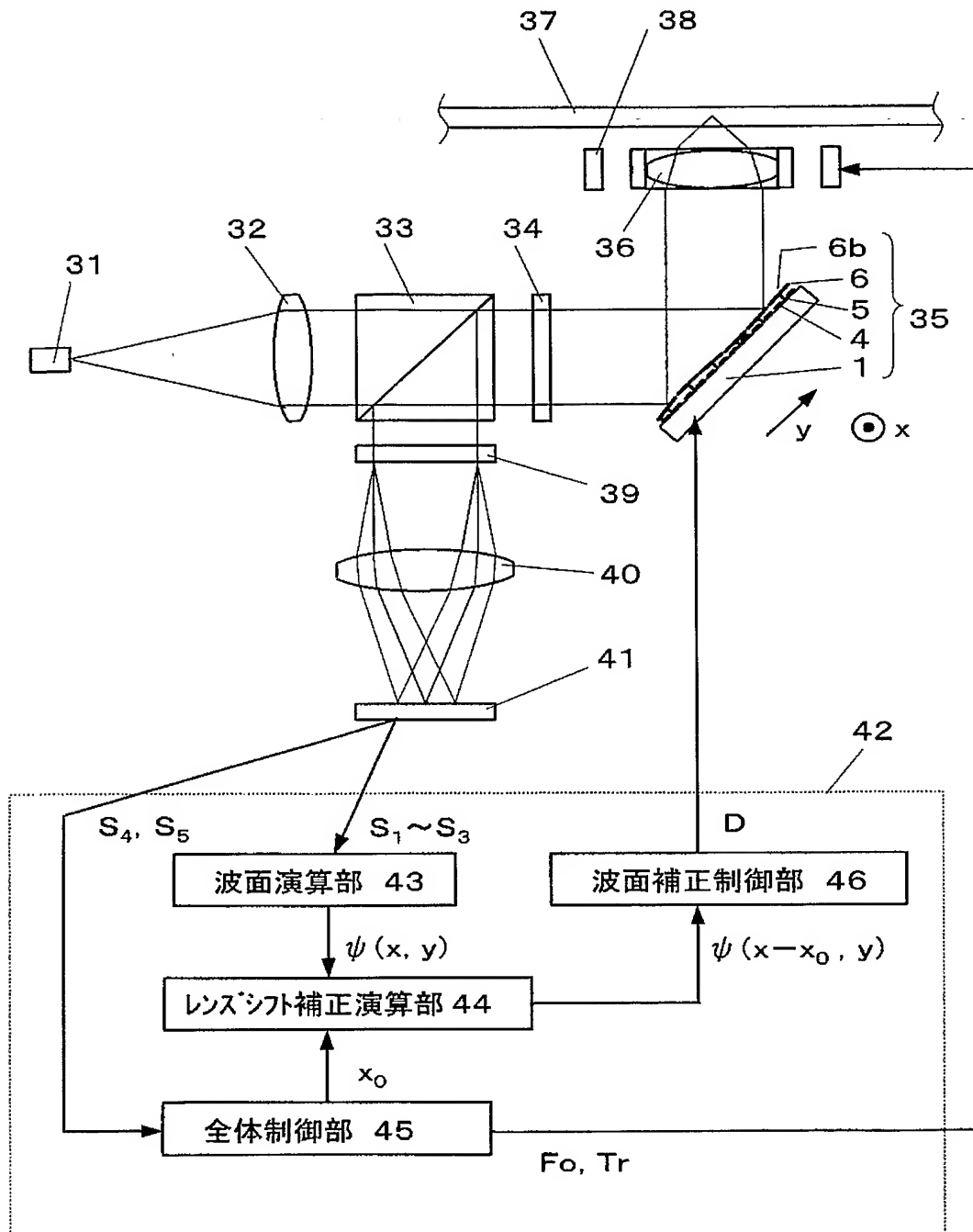
(a)



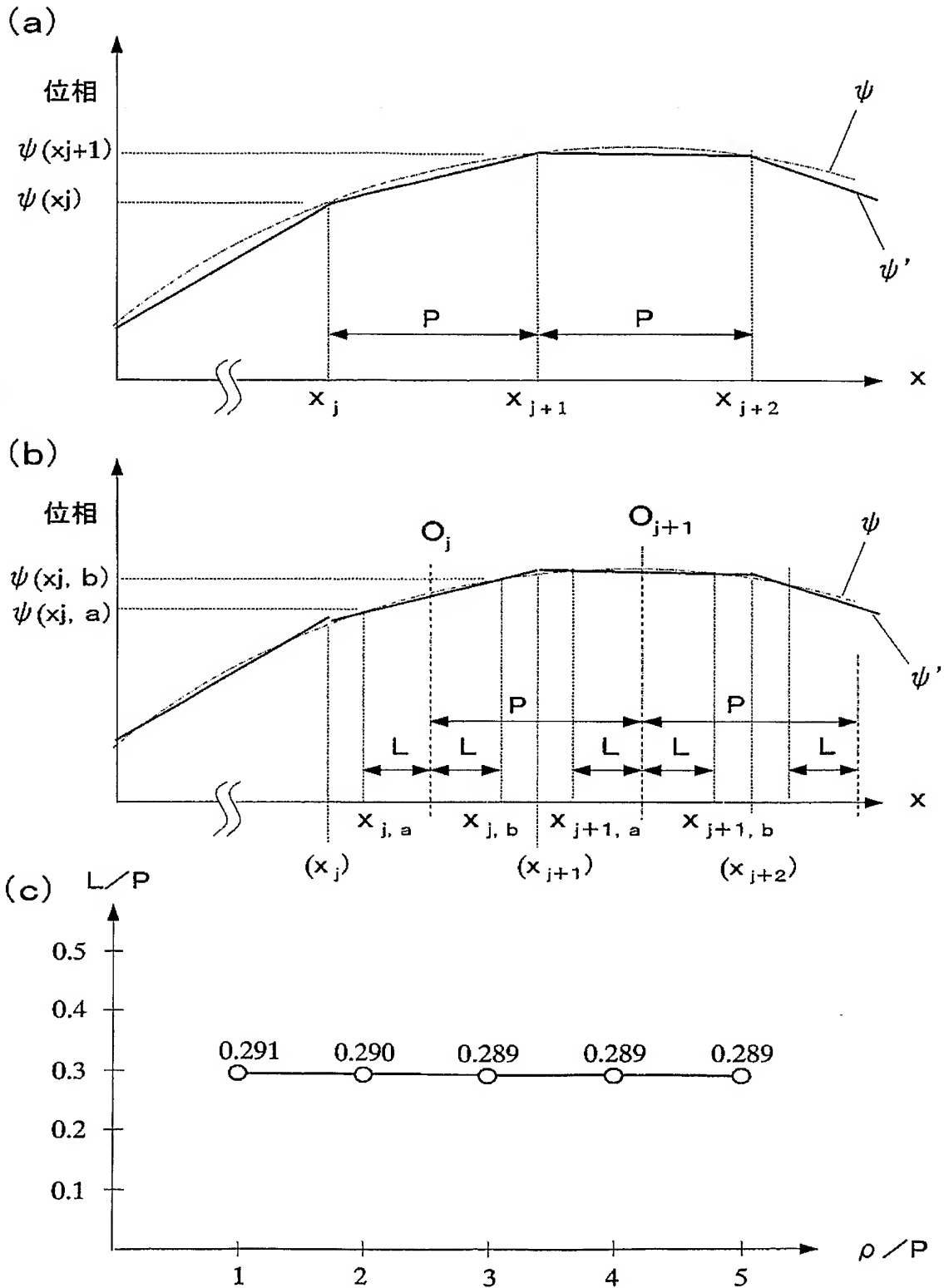
(b)



【図 7】

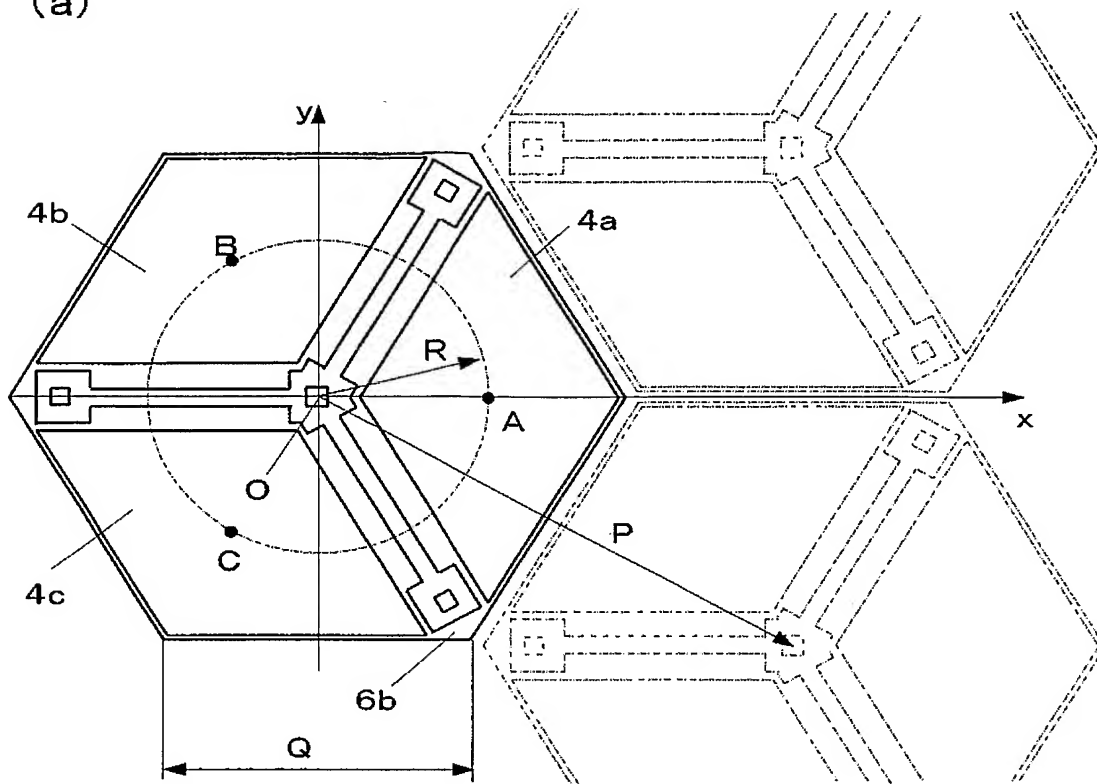


【図 8】

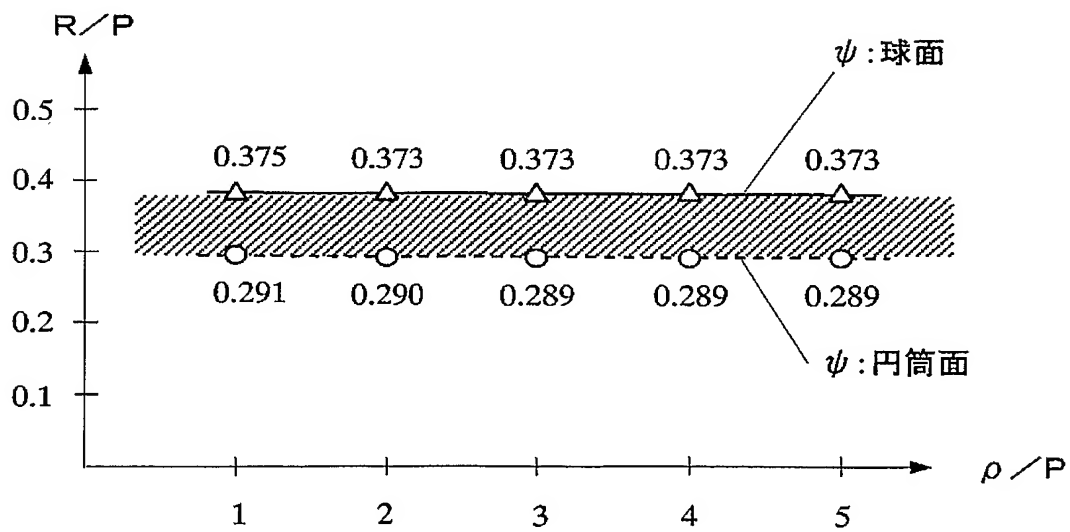


【図 9】

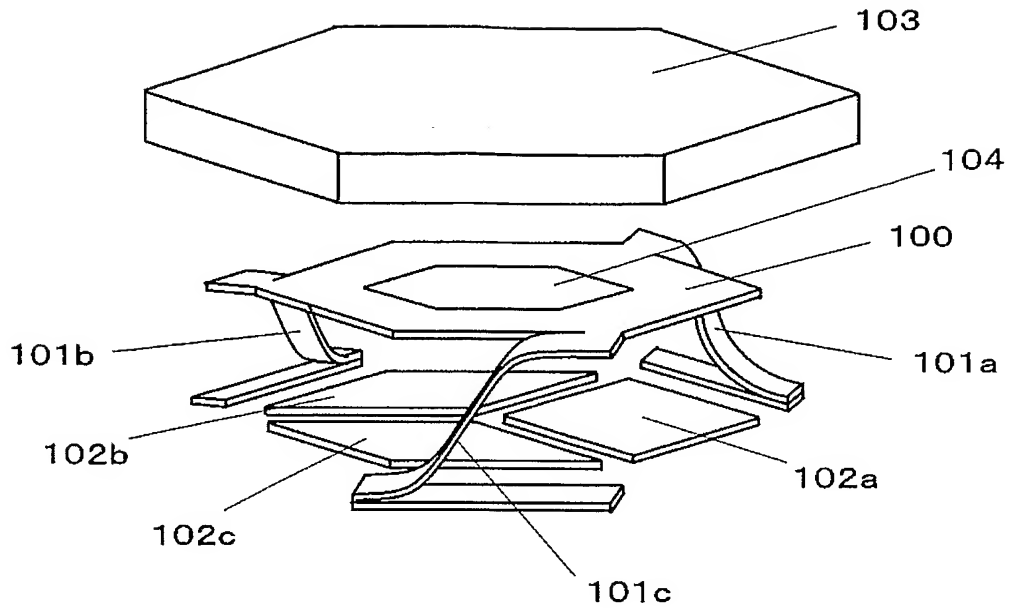
(a)



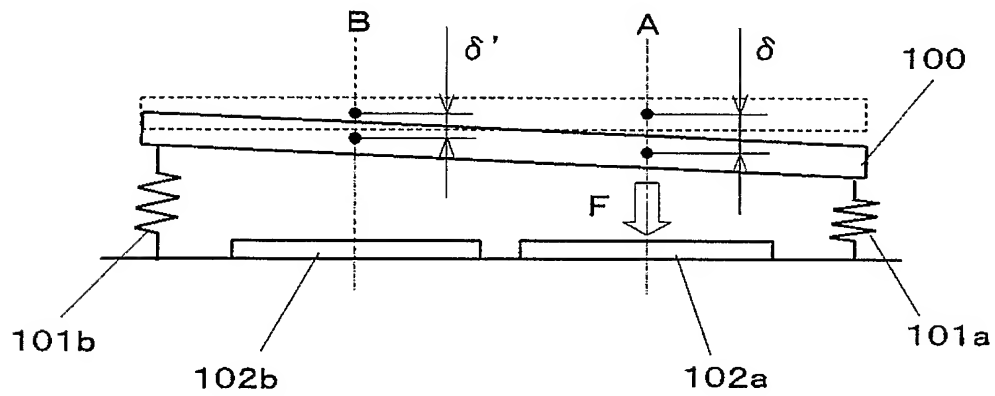
(b)



【図 10】



【図 11】



【書類名】 要約書

【要約】

【課題】複数の駆動部が発生する駆動力によって、可動部に並進方向と傾動方向への少なくとも 2 軸の変位を行わせるマイクロアクチュエータにおいて、各駆動部の駆動力と可動部の対応位置での変位との間の対角制御性を高める。

【解決手段】弾性支持部が可動部の概中央部を支持し、並進方向の変位に対するバネ定数 k_z と、傾動方向の変位に対するバネ定数 k_r とに所定の関係を与えることで、各駆動部間の変位の干渉を抑えて、対角制御性を高める。

【選択図】 図 1

特願 2 0 0 4 - 0 6 3 5 1 8

出 願 人 履 歴 情 報

識別番号

[0 0 0 0 0 5 8 2 1]

1. 変更年月日

1 9 9 0 年 8 月 2 8 日

[変更理由]

新規登録

住 所

大阪府門真市大字門真 1 0 0 6 番地

氏 名

松下電器産業株式会社